

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

**Měření orientace objektu ve statických a dynamických
podmínkách**

**Measurement of Object Orientation in Static and Dynamic
Condition**

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....
Václav Žvak

Datum odevzdání diplomové práce: 7. května 2010

Poděkování

Touto cestou bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Davidu Valovi za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Abstrakt

Předmětem této práce je seznámení se s problematikou měření orientace objektu a funkcí inerciálních systémů. Úkolem je navrhnout a prakticky realizovat takovýto inerciální systém pro měření absolutní orientace vůči povrchu země.

Úvodem je zmíněn princip inerciálních systémů. Funkce a použití inerciální navigace, její doplňkové systémy a její výhody. Dále jsou zde uvedeny senzory využívající se pro inerciální systémy a senzory využívající vnějších signálů pro zlepšení přesnosti systému. Uvádím i jejich obecné principy funkce. V další části je porovnání dostupnosti, parametrů a cen hlavních senzorů inerciální navigace, kterými jsou akcelerometry a gyroskopy. Následuje oblast, kde jsou popsány komunikační sběrnice propojující senzory s mikroprocesorovou jednotkou.

Praktická část se zabývá vlastními použitými senzory a dalšími integrovanými obvody. Je zde uveden princip jejich měření a způsob přenosu dat společně s jejich zapojením. Závěr je zaměřen na prakticky realizovaný model inerciálního systému doplněný o vytvořený program pro vizualizaci snímaných veličin na počítači.

Klíčová slova

Inerciální systém, akcelerometr, gyroskop, digitální kompas.

Abstract

The aim of this thesis is to introduce the issues of the measurement of object orientation and the function of inertial systems. The task is to design and implement in practise such inertial system for measuring the absolute orientation towards the Earth's surface.

The principle of inertial systems is mentioned in the first part of the thesis, including the function and usage of inertial navigation, its complementary systems and advantages. Also the sensors used for inertial systems and sensors using the internal signal for better accuracy of the system, are stated there. The general principles of their function are given there as well. In the next part, there is a comparison between the accessibility, parameters and price of the main sensors of inertial navigation, e.g. accelerometers and gyroscopes. Further on, there is a part where the communication bus connecting sensors with the microprocessor unit, are described here.

In the practical part, there is an individual analysis of sensors and other integrated circuit, carried out by the author himself. The principal of their measurement, the way of data transfer and its connection, is stated here. The final part is concentrated on the inertial system model supplemented with program for computer visualisation of data, which is realized in the thesis from the practical point of view.

Key words

Inertial system, accelerometer, gyroscope, digital compass.

Seznam použitých symbolů a zkratek

α – vektor úhlové rychlosti
A/D – převodník z analogového signálu na digitální
ACK – příznakový bit
AMR – anizotropní magneto-rezistivní technologie
CAN – datová komunikační sběrnice užívaná v automobilech
CAN_H – signálový vodič sběrnice CAN
CAN_L – signálový vodič sběrnice CAN
Flash – paměť s libovolným přístupem
g – tíhové zrychlení [ms^{-2}]
GPS – Global Positioning System
HDD – pevný disk počítače
I – moment setrvačnosti
I2C – sériová sběrnice typu multi-master
INS – Inerciální Navigační Systém
INT – hardwarové přerušení
L – vektor úhlového momentu gyroskopu
LCC - typ pouzdra integrovaných obvodů
LGA – typ pouzdra integrovaných obvodů
LSB – nejméně významný bit
Master – řídící zařízení systému
MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems
MISO - komunikační linka sběrnice SPI pro předávání dat od Slave k Masteru
MOSI – komunikační linka sběrnice SPI pro předávání dat od Masteru k Slave
PE – piezoelektrické
Pitch – příčná osa
PR – piezorezistivní
Roll – podélná osa
SCK – časovací linka sběrnice SPI
SCL – časovací linka sběrnice I2C
SDA – datová linka sběrnice I2C
Slave – vedlejší zařízení systému
Smart – označení převodníků obsahující procesor
SPI – sériová sběrnice typu Master-Slave
SS – linka sběrnice SPI pro výběr zařízení typu Slave
 τ - vektor točivého momentu gyroskopu
VC – proměnná kapacita
 ω – vektor úhlové rychlosti
Yaw – kolmá osa

Seznam použitých cizích slov

Aktuátor – pohonná jednotka

Arbitrace – (u adresy)

Gyromouse – myš k počítači využívající jako snímacího prvku gyroskopu

Inner frame – vnitřní rám

Microwire – sériová sběrnice

Outdoor – venkovní

Resonating mass – rezonující struktury

Self-test – zařízení otestuje samo sebe

Spaceball – obdoba joysticku, ale v 3D

Springs – pružiny

Translance – posunutí

Zero-rate level – působení nulové úhlové rychlosti na senzor

Seznam obrázků

Obr. 1 Translace a rotace souřadného systému	3
Obr. 2 Vyjádření aktuální prostorové situace (x''', y''', z''') referovaný k výchozímu systému (x, y, z) v Eulerově souřadné soustavě	4
Obr. 3 Kapacitní akcelerometr	8
Obr. 4 Piezoelektrický akcelerometr	8
Obr. 5 Piezorezistivní akcelerometr	9
Obr. 6 mechanický gyroskop	11
Obr. 7 Možnosti měření natočení a rotace	11
Obr. 8 Příklad působení Coriolisovy síly	12
Obr. 9 Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop	12
Obr. 10 Zjednodušená struktura snímače MEMS gyroskopu	13
Obr. 11 Příklad funkce struktury gyroskopu při rotaci	13
Obr. 12 Magnetorezistivní čidlo z materiálu permalloy.....	14
Obr. 13 Měření magnetického pole.....	15
Obr. 14 Princip tenzometru	16
Obr. 15 Piezoelektrický jev u krystalu křemene	16
Obr. 16 Kapacitní snímač.....	17
Obr. 17 Celková koncepce systému se sběrnici SPI	21
Obr. 18 Propojení stanic Master a Slave	21
Obr. 19 Význam parametrů CPOL a CPHA na sběrnici SPI	22
Obr. 20 Čtení dat z paměti s rozhraním SPI.....	23
Obr. 21 Zápis dat do paměti s rozhraním SPI	23
Obr. 22 Celková koncepce sběrnice I ² C sběrnice	24
Obr. 23 Podmínky START a STOP.....	24
Obr. 24 Časování signálu SCL na I ² C.....	25
Obr. 25 Synchronizace hodin SCL.....	25
Obr. 26 Formát rámců na sběrnici I ² C	26
Obr. 27 Arbitrace na I ² C. Master1 ztrácí právo na sběrnici	26
Obr. 28 Potvrzování příjmu bitem ACK	27
Obr. 29 Principiální schéma sběrnice CAN	28
Obr. 30 Toleranční pásmo napětíových úrovní logických stavů na sběrnici CAN.....	29
Obr. 31 Přenos jednoho informačního bitu v síti CAN.....	30
Obr. 32 Blokové schéma akcelerometru MMA7455L.....	32
Obr. 33 Model kapacitního snímače zrychlení.....	33
Obr. 34 Schéma zapojení akcelerometru MMA7455L	33

Obr. 35 Blokové schéma gyroskopu LPR530AL.....	34
Obr. 36 Blokové schéma gyroskopu LY530ALH.....	35
Obr. 37 Citlivé osy gyroskopu LPR530AL.....	35
Obr. 38 Citlivá osa gyroskopu LY530ALH.....	36
Obr. 39 Schéma zapojení gyroskopu LPR530AL.....	37
Obr. 40 Schéma zapojení HMC5843	39
Obr. 41 Modul digitálního kompasu	39
Obr. 42 Popis konektoru modulu kompasu	40
Obr. 43 Schéma zapojení nekompenzovaného tlakového senzoru	41
Obr. 44 Blokové schéma procesoru ATmega16	43
Obr. 45 Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega16	44
Obr. 46 Blokové schéma CAN kontroléru	45
Obr. 47 Bloková realizace systému	46
Obr. 48 Vnitřní schéma budiče SN65HVD1040.....	47
Obr. 49 Schéma zapojení řadiče sběrnice CAN	48
Obr. 50 Schéma zapojení budiče sběrnice CAN	48
Obr. 51 Blokové schéma navrženého systému.....	50
Obr. 52 Fotografie a popis zkušebního modulu	51
Obr. 53 Popis konektorů zkušebního modulu	52
Obr. 54 Fotografie a popis výsledného modulu	53
Obr. 55 Popis konektorů výsledného modulu	53
Obr. 56 Výběr sériového portu.....	54
Obr. 57 Okno demonstračního programu.....	54
Obr. 58 Část s daty z gyroskopů	55
Obr. 59 Část s daty z akcelerometru	55
Obr. 60 Ovládání programu	55
Obr. 61 Měření náklonu systému	56

Obsah

OBSAH.....	9
1 ÚVOD.....	1
2 INERCIÁLNÍ A NEINERCIÁLNÍ SOUSTAVA	2
2.1 INERCIÁLNÍ SOUSTAVA	2
2.2 NEINERCIÁLNÍ SOUSTAVA.....	2
3 INERCIÁLNÍ NAVIGACE.....	3
3.1 PRINCIP INERCIÁLNÍHO SYSTÉMU	3
3.2 DOPLŇKOVÉ INERCIÁLNÍ SYSTÉMY.....	5
3.3 VÝHODY INERCIÁLNÍ NAVIGACE.....	5
4 SENZORY PRO INERCIÁLNÍ NAVIGACI.....	6
4.1 AKCELEROMETRY.....	6
4.2 GYROSKOPY	9
4.2.1 Mechanický gyroskop.....	10
4.2.2 Prstencový laserový gyroskop.....	11
4.2.3 Obecný princip gyroskopů MEMS.....	11
4.2.3.1 Příklad provedení samotného MEMS snímače.....	13
4.3 MAGNETICKÉ SENZORY	14
4.3.1 Magnetorezistivní sondy.....	14
4.4 TLAKOVÉ ELEKTRONICKÉ SENZORY	15
4.4.1 Snímače s odporovými tenzometry	15
4.4.2 Piezoelektrické snímače tlaku	16
4.4.3 Kapacitní snímače tlaku.....	17
4.4.4 Smart převodníky tlaku.....	17
5 PARAMETRY A DOSTUPNOST SENZORŮ	18
5.1 PŘEHLED NĚKTERÝCH ELEKTRONICKÝCH AKCELEROMETRŮ	18
5.2 PŘEHLED NĚKTERÝCH ELEKTRONICKÝCH GYROSKOPŮ.....	18
6 SBĚRNICOVÝ SYSTÉM	20
6.1 ROZHRANÍ SPI.....	20
6.2 ROZHRANÍ I ² C	23
6.2.1 Fyzická vrstva.....	24
6.2.2 Linková vrstva	25
6.2.2.1 Arbitrace	26
6.2.2.2 Adresování.....	27
6.2.2.3 Potvrzování.....	27
6.2.3 Praktická realizace.....	28
6.3 SBĚRNIC CAN	28
Datový rámec (DATA FRAME).....	30
Žádost o rámec (REMOTE FRAME)	31
Chybový rámec (ERROR FRAME).....	31
Rámec přeplnění (OVERLOAD FRAME)	31

7	ZVOLENÉ SENZORY A OSTATNÍ INTEGROVANÉ OBVODY	32
7.1	AKCELEROMETR MMA7455	32
7.1.1	<i>Princip funkce</i>	<i>32</i>
7.1.2	<i>Schéma zapojení akcelerometru.....</i>	<i>33</i>
7.2	GYROSKOPY LY530 A LPR530	34
7.2.1	<i>Schéma zapojení.....</i>	<i>37</i>
7.3	DIGITÁLNÍ MAGNETICKÝ KOMPAS HMC5843	38
7.3.1	<i>Schéma zapojení testovací desky s HMC5843.....</i>	<i>38</i>
7.3.2	<i>Testovací deska s HMC5843.....</i>	<i>39</i>
7.4	TLAKOVÉ ČIDLO MPL115A	40
7.4.1	<i>Kompenzace</i>	<i>41</i>
7.5	MIKROPROCESOR ATMEGA16	42
7.5.1	<i>Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega16</i>	<i>44</i>
7.6	CAN PŘEVODNÍK.....	45
7.6.1	<i>Schéma zapojení kontroléru a budiče sběrnice CAN</i>	<i>47</i>
8	PRAKTICKÝ NÁVRH INERCIÁLNÍHO SYSTÉMU.....	49
8.1	BLOKOVÉ SCHÉMA SYSTÉMU	49
8.2	MODUL INERCIÁLNÍHO ZKUŠEBNÍHO SYSTÉMU.....	50
8.3	VÝSLEDNÝ MODUL INERCIÁLNÍHO SYSTÉMU	52
9	DEMONSTRAČNÍ PROGRAM.....	54
10	VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ	56
11	ZÁVĚR.....	58

1 Úvod

Tématem této práce je seznámení se s problematikou měření orientace objektu a funkcí inerciálních systémů. Úkolem je navrhnout a prakticky realizovat takovýto inerciální systém pro měření absolutní orientace vůči povrchu země.

Navigační přístroje, jsou již od nepaměti používány k orientaci v neznámém prostředí. Navigace se rozvíjela ve spojení s lodní dopravou, kdy se lodě plavily při pobřeží podle orientačních bodů. V 15. Století vyplouvali už na širé moře, kde ovšem měli problém s určováním zeměpisné délky. Při jejím výpočtu vznikala velká chyba, protože čas byl měřen přesýpacími hodinami. V roce 1884 byl dohodnut jednotný nultý poledník a od té doby se ve velké síle začala rozvíjet obchodní a vojenská navigace.

V dnešní době se již ve velkém prosazují pro osobní navigaci levné zařízení GPS (Global Positioning System), které jsou již lehce dostupné široké veřejnosti. Široké využití nacházejí například v plánování a navigaci cest v automobilismu, jednoduší modely jsou využívány v outdoorových aktivitách jako je turistika, horolezectví, cyklistika, pomocí nichž je možné lehce určit aktuální polohu. Bohužel ale zařízení GPS nejsou využitelná ve všech prostředích, signál ze satelitů není možno přijímat v uzavřených prostorech, jako jsou například budovy, jeskyně či například pod vodní hladinou. V těchto místech přichází na řadu navigační přístroje využívající inerciální navigaci, která není závislá na žádném signálu ze satelitů.

Metoda nazývaná inerciální navigace je proces, při kterém se za pomoci inerciálních senzorů, jako jsou gyroskopy a akcelerometry provádí měření, jehož hodnoty slouží pro výpočet postupného pohybu zařízení (vozidla, letadla, ponorky, rakety...) v rámci vnitřního inerciálního systému souřadnic. Přibližně kolem roku 1800 byl vynalezen první gyroskop. Mechanický gyroskop byl založený na inerciálních vlastnostech rychle se točícího rotoru. Využíval vlastnosti úhlové hybnosti rotoru, díky které odolával změně orientace. V blízkosti zemského povrchu na všechny hmotné částice působí gravitační síla. Pomocí soustavy akcelerometrů, které jsou citlivé na tuto sílu, je možné analýzou směru působení gravitační síly, částečně určit orientaci objektu v prostoru. Tato technologie byla patentována v roce 1910 v Německu a později používána např. k navigaci raket V-1 a V-2. Později tyto senzory nahradily elektromechanické nebo elektrooptické senzory.

Celý princip tedy spočívá v efektu, že známe-li startovní pozici objektu a zaznamenáme-li změny zrychlení ve všech osách, které jsou pro měření podstatné, jsme schopni vypočítat současnou rychlost a pozici. Princip metody je jednoduchý, ale praktická realizace je velmi obtížná, protože s integrací užitečného signálu je integrována i chyba. Inerciální navigace využívá obvykle tří gyroskopů (určení náklonů) a tří akcelerometrů (určení zrychlení) pro určení rozdílů polohy a natočení. Protože to není nekonečně přesně a v nekonečně krátké době, hromadí se chyba, a proto je systém využíván pro určení polohy v mezích mezi dvěma určeními polohy GPS (obvykle 0,5 s).

1.1 Inerciální soustava

Zobecněním úvah o inerciálních vztažných soustavách dospěli fyzikové již v 17. století k obecně platnému závěru, k mechanickému principu relativity (též Galileiho princip relativity), že zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních vztažných soustavách. Rovnice, které tyto zákony vyjadřují, mají stejný tvar. Všechny inerciální vztažné soustavy jsou pro popis mechanických dějů rovnocenné. Skutečnost, že zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních soustavách, neznámá, že také všechny měřené fyzikální veličiny, které popisují stav daného tělesa, mají stejnou hodnotu.

Soustavu spojenou s povrchem Země považujeme za inerciální (soustava, která se vzhledem k povrchu Země pohybuje rovnoměrně (nebo je v klidu) - vztažná). Žádným mechanickým pokusem nelze určit, zda je soustava v klidu či v rovnoměrném pohybu.

Za inerciální vztažnou soustavu budeme považovat takovou, která se vzhledem ke stálici (Slunci) buď nepohybuje ($v = 0$), nebo se všechny její pevné body pohybují rovnoměrně přímočaře (vektor $v = \text{konst.}$). Při takovém pohybu žádný pevný bod v této soustavě nebude zakřivovat svoji trajektorii. Platí, že každá další vztažná soustava, je-li vzhledem k inerciální soustavě v klidu nebo pohybu rovnoměrném přímočarém, je rovněž inerciální. Jako příklad můžeme uvést například stěny vagonu, který se pohybuje po přímé trati stálou rychlostí. V inerciálních vztažných soustavách platí 1. Newtonův pohybový zákon – zákon setrvačnosti.

Inerciální vztažné soustavy jsou takové vztažné soustavy, které se vzhledem k sobě pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem nebo jsou vzájemně v klidu.

[11], [15]

1.2 Neinerciální soustava

Všechny ostatní vztažné soustavy jsou neinerciální. V neinerciálních vztažných soustavách neplatí 1. Newtonův pohybový zákon ani 3. Newtonův pohybový zákon, tzn., že těleso, ačkoliv na ně nepůsobí žádná síla nebo výslednice sil je nulová, mění svůj pohybový stav (rychlost), tzn., pohybuje se s nenulovým zrychlením. Modelu inerciální vztažné soustavy s dobrou přesností vyhovuje Galileova vztažná soustava, jejíž počátek leží v hmotném středu sluneční soustavy a osy mají vzhledem ke stálicím stálý směr. Vztažná soustava spojená se Zemí (laboratorní vztažná soustava) je neinerciální, protože se vzhledem ke Galileově vztažné soustavě pohybuje po zakřivené trajektorii a současně se otáčí. Při běžných dějích však nejsou projevy její neinerciálnosti příliš významné, a proto ji v prvním přiblížení obvykle považujeme za soustavu inerciální.

[11]

2 Inerciální navigace

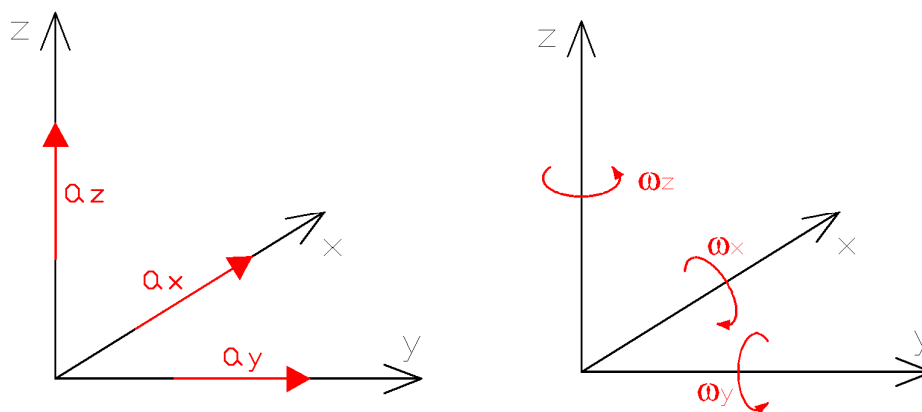
Inerciální navigace je metoda, pomocí které je možno určovat aktuální polohu v prostředí bez jakýchkoliv dodatečných signálů ze satelitů, používá totiž senzorů, jako jsou akcelerometry, gyroskopy pro měření zrychlení a úhlové polohy.

2.1 Princip inerciálního systému

Princip je jednoduchý při známé výchozí poloze navigovaného objektu, který nese jednotku se zařízením pro inerciální navigaci a zaznamenává změny zrychlení a úhlového natočení, z těchto údajů je možné vypočítat rychlost a polohu tohoto zařízení. Praktická realizace je již obtížnější, jelikož je třeba při výpočtu několikrát integrovat naměřený signál a tím se zvyšuje i chyba určení polohy zařízení.

Aktuální polohu pohybujícího se tělesa můžeme popsat pomocí šesti parametrů: tří translací (x -, y -, z - zrychlení) a tří rotací (x -, y -, z - úhel natočení). To stačí k určení polohy zařízení, s využitím například tří akcelerometrů a tří gyroskopů, dohromady tyto údaje tvoří ortogonální soustavu. Hodnotu urazené vzdálenosti a aktuálního natočení zařízení získáme pomocí integrace jednotlivých translací a rotací. Při precizním a periodickém vykonávání těchto výpočtů je možné s ideálním systémem vytvářet trasu pohybu a zjišťovat aktuální polohu a kurz.

[10]

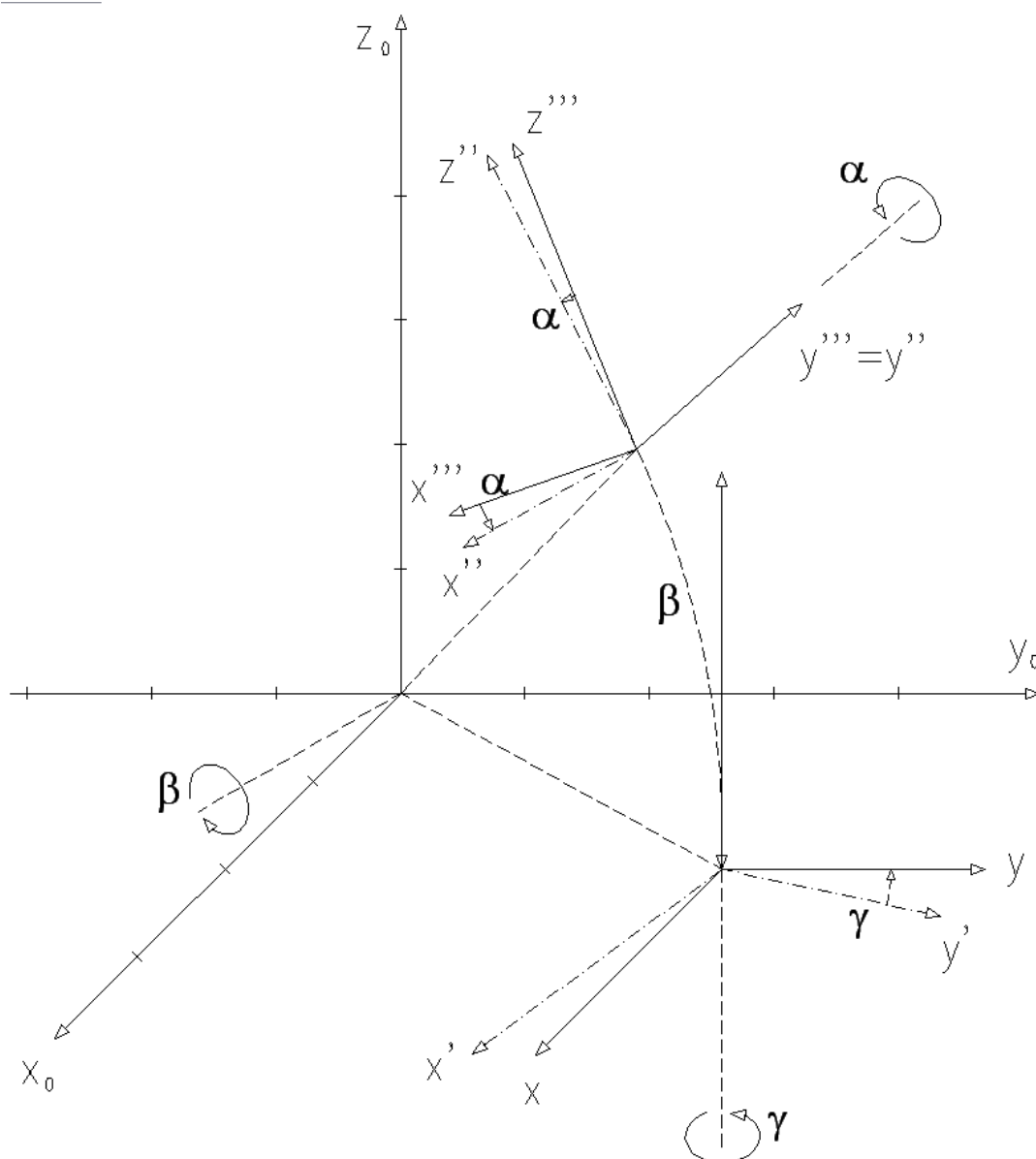


Obr. 1 Translace a rotace souřadného systému

Hlavní omezení systémového provedení je dáno konečnou precizností senzorů. Průběžná malá chyba v akceleraci se v první řadě integruje ve velkou chybu určení aktuální rychlosti, a při druhém integrování v ohromnou chybu ve vzdálenosti. Proto jsou precizní senzory a opravné mechanismy proti chybám velice důležité k dosažení přesné platformy pro inerciální navigaci. Jako příklad levného zpětnovazebního algoritmu je G-vektor. Není potřeba žádný dodatečný hardware, ale jen jednoduchý předpoklad, že průměrný směr akcelerace osy Z jde většinou kolmo dolů k zemskému povrchu a jeho průměrná hodnota je $-9,81 \text{ m/sec}^2$. Jiná zpětnovazební metoda je zavedení GPS pozice přímo do inerciálního navigačního systému, ale tento koncept vyžaduje pečlivé rozvrhování při obnovovacím mechanismu nerušeného vstupního systému. Jiný složitý, který potřebuje pečlivý výpočet je přidání

pravoúhlého souřadnicového systému. Zde existuje rozdílné řešení - nějaký z nich s přidanou povolenou redundancí pro přesnější určení hodnot. Jsou definovány tři osy: roll(alpha), pitch (beta) a směr (gamma). Translace jednotlivých složek vztahujících se k výchozímu systému je vyjádřena jako: $(x''', y''', z''') = (\alpha) \Rightarrow (x'', y'', z'') = (\beta) \Rightarrow (x', y', z') = (\gamma) \Rightarrow (x, y, z)$.

[10]



Obr. 2 Vyjádření aktuální prostorové situace (x''', y''', z''') referovaný k výchozímu systému (x, y, z) v Eulerově souřadné soustavě

Výpočet aktuálních zrychlení:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) & -\sin(\gamma) \cdot \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) & \cos(\gamma) \cdot \cos(\beta) & +\sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \\ \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\gamma) \cdot \cos(\beta) & \cos(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & & +\sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) & -\sin(\beta) & \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x''' \\ \Delta y''' \\ \Delta z''' \end{pmatrix} \quad (1)$$

Výpočet aktuálních úhlových natočení:

$$\begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\alpha) \cdot \tan(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \tan(\beta) \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) / \cos(\beta) & \cos(\alpha) / \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \alpha''' \\ \Delta \beta''' \\ \Delta \gamma''' \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 Doplnkové inerciální systémy

Nedostatky samotných GPS přijímačů pro určování polohy, zejména jejich neschopnost poskytovat věrohodné informace v místech, kde není možný příjem dostatečného počtu vhodně umístěných vysílacích satelitů, vedla ke kombinaci vlastních přijímačů GPS s inerciálními navigačními systémy (INS), přičemž celek se obvykle označuje jako přijímač GPS/INS. INS pracují na principu určení dráhy ze změřeného zrychlení při pohybu (ve dvou nebo třech osách) a tento princip je realizován mechanickými, laserovými nebo piezoelektrickými gyroskopy. Algoritmy zpracování výsledné informace o poloze jsou ovšem opět založeny na pravděpodobnostních principech, protože výsledky měření jsou zatíženy řadou systematických i náhodných chyb. Nevýznamným omezením možností systémů INS je skutečnost, že systém může (na rozdíl od GPS) určit polohu jen v případě, že zná z jiného zdroje polohu počáteční.

[13]

2.3 Výhody inerciální navigace

Velkou výhodou použití inerciální navigace je tzv. soběstačnost navigačního systému, což znamená, že pro funkci nejsou nutné žádné externí objekty. Nevýhodou je zatím stále nedostatečná přesnost senzorů pro inerciální navigaci pro mnohé aplikace.

Doplnění inerciálního navigačního systému s akcelerometry o elektronický kompas snižuje chybu způsobenou integrací signálu z akcelerometrů a gyroskopů.

Existují dva základní přístupy k inerciální navigaci. První z nich používá kardanový systém, který využívá gyroskopicky stabilizovanou platformu pro vyvážení senzorů s předdefinovaným referenčním rámem. Jejich výhodou je to, že na ně působí menší síly a je snadnější vypočítat aktuální pozici. Mají nižší spotřebu energie a nižší cenu. Bezkardanový inerciální navigační systém používá plošinu pevně spojenou s vozidlem a levné inerciální senzory, tedy akcelerometry a gyroskopy v podobě integrovaných obvodů, což způsobuje příklon především k této technologii.

[12]

3 Senzory pro inerciální navigaci

Inerciální navigace je založena na měření složek zrychlení ve třech osách absolutními senzory zrychlení a následné dvojnásobné integraci výstupních signálů. Využívá také senzorů úhlové rychlosti. Pro určení polohy je nutné znát počáteční polohu objektu.

Dále se používají magnetická čidla jako magnetického kompasu k určování orientace, popřípadě tlakové senzory k orientačnímu měření rychlosti.

[4]

3.1 Akcelerometry

Jsou to v dnešní době velmi používané snímače. Primární veličinou, kterou akcelerometry snímají je zrychlení. Akcelerometry jsou schopny měřit zrychlení jak dynamické, tak gravitační. Statické zrychlení je již ze svého principu neustále přítomné a je ho tedy nutné při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací. Senzory mohou měřit od velmi nízkých hodnot g, ale dokážou vydržet nárazově i hodnoty v okolí 1000g.

Specifikace akcelerometrů

Dynamický rozsah - je to +/- maximální amplituda, kterou lze změřit, než se snímač poškodí, je uváděn v násobku g.

Frekvenční odezva - je určena hmotností snímače, piezoelektrickými vlastnostmi krystalu a rezonanční frekvencí krytu snímače. Je to frekvenční rozsah, v němž výstupní hodnota signálu akcelerometru má dovolenou odchylku +/-5%. Zemské zrychlení 9,8 m/s² je 1g.

Uzemnění - Zemnění signálu akcelerometrů se provádí dvojím způsobem. Uzemněné akcelerometry mají s krytem spojen pól s nižším potenciálem. Protože je kryt snímače spojen se signálem a při montáži upevněn k vodivému materiálu, musí být věnována výběru snímače pozornost, abychom se vyhnuli problémům s rušením. Snímače s krytem odizolovaným od signálu jsou zase citlivé na indukované rušení.

Horní frekvenční limit - je to frekvence, kdy výstupní signál překročí dovolenou odchylku. Souvisí to vždy s mechanickou rezonancí daného snímače.

Dolní prahová frekvence - je to frekvence, při níž výstupní signál začíná klesat nebo jeho přesnost překračuje dovolenou mez. Není to zcela nulový signál, avšak citlivost velmi rychle s nižší frekvencí klesá.

Rušení - elektronické rušení je generováno v obvodech zesilovače. Toto frekvenční rušení může být buď širokopásmové, nebo spektrální. Úrovně šumu jsou specifikovány v "g" např.: 0,0025g ; 2 - 25000Hz. Šum obvykle klesá s frekvencí a rušení na nízkých frekvencích tak bývá větším problémem než na frekvencích vysokých.

Rezonanční frekvence - je to frekvence, na níž snímač rezonuje nebo zvučí. Frekvenční měření se snímači zrychlení se provádějí pod touto rezonanční frekvencí.

Citlivost - je to výstupní napětí snímače při měření určité síly vyjádřené v "g". Akcelerometry se dělí do dvou kategorií - s citlivostí 10mV/g nebo 100mV/g. Frekvence střídavého výstupního napětí odpovídá frekvenci vibrací. Výstupní úroveň napětí odpovídá amplitudě vibrací. Akcelerometry s nízkou úrovní výstupu se používají k měření vyšších úrovní vibrací, zatímco akcelerometry s vysokou úrovní výstupu jsou používány k měření nízkých úrovní vibrací.

Teplotní vliv (citlivost na teplotu) - je to výstupní napětí na stupeň Celsia měřené teploty. Snímače jsou teplotně kompenzovány s cílem udržení změn výstupního signálu v daných limitech v daném rozsahu teploty.

Teplotní rozsah - je limitován integrovaným obvodem konvertujícím elektrický náboj na nízkoimpedanční výstup. Typický rozsah je -50 až 120 stupňů C.

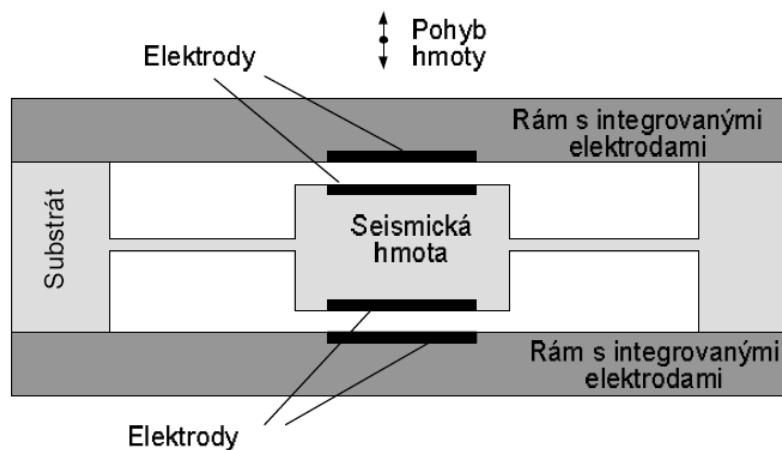
Využití akcelerometrů lze rozdělit na oblasti:

- detekce pádu (ochrana HDD);
- stabilizace obrazu;
- navigace;
- kontrola rovnováhy přístrojů;
- monitorování seizmické aktivity;
- detekce nárazu (airbagy);
- dynamická kontrola vozidla (brzdové systémy);
- rehabilitační přístroje;
- pedometry;
- zařízení pro sportovní lékařství;
- atd.

Akcelerometry lze rozdělit, jednak podle toho kolik mají citlivých os a to na akcelerometry jednoosé, dvouosé a tříosé, nebo na akcelerometry se seizmickou hmotou a MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) akcelerometry s proměnou kapacitou.

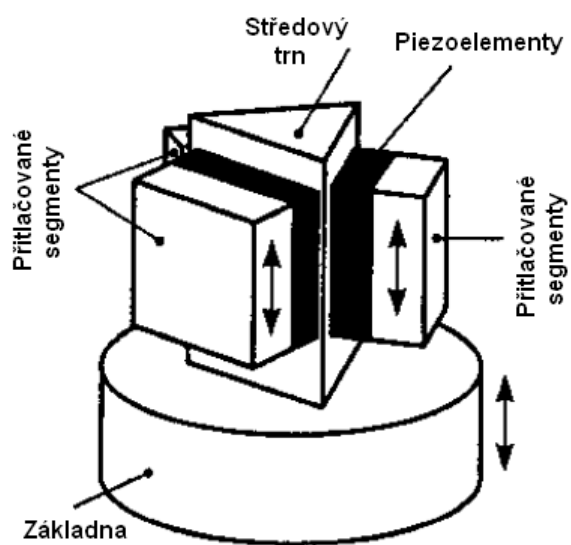
Rozdělení akcelerometrů:

- Se seizmickou hmotou
 - Kapacitní akcelerometry – při pohybu dochází ke změně vzdálenosti elektrod kondenzátoru → změna kapacity.



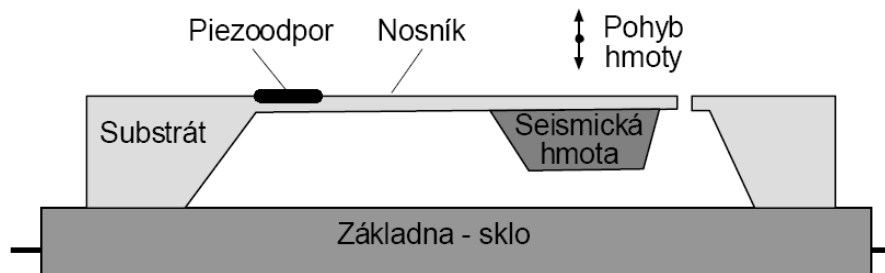
Obr. 3 Kapacitní akcelerometr

- Piezoelektrické akcelerometry (PE) – využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt.



Obr. 4 Piezoelektrický akcelerometr

- Piezorezistivní akcelerometry (PR) – využívají mikro-křemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu.



Obr. 5 Piezorezistivní akcelerometr

- MEMS technologie
 - Akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC) – využívají mikro-křemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity. Zatímco elektronika je vyráběna standardními postupy výroby integrovaných obvodů, mikromechanické komponenty jsou vytvářeny s použitím vhodných mikroobráběcích procesů, které selektivně vyleptávají části křemíkového plátku, nebo přidávají nové strukturální vrstvy a vytvářejí tak mechanická a elektromechanická zařízení.

[8], [14], [16], [19]

3.2 Gyroskopy

Gyroskop je zařízení, určené k navigaci a určování směru. Princip gyroskopu je znám od roku 1817, kdy jej objevil Johann Bohnenberger. Jako konstruktér gyroskopu je však označován až Léon Foucault, který na skutečném modelu předváděl v roce 1852 rotaci Země.

Gyroskopy jsou již dlouhou dobu známy a využívány pro měření a určování změny polohy nebo natočení libovolného předmětu, ke kterému jsou připevněny. Dříve však bylo možné použít jen mechanické provedení, případně optické s využitím světla, světlovodných vláken. Dnes je již lze najít v integrované podobě klasických součástek obsahující mimo samotný snímač i celou škálu vyhodnocovacích obvodů a logiky. Výstup je pak analogový, digitální nebo obojí. Díky tomu lze gyroskopy použít i v běžných aplikacích, nejen ve vědě a výzkumu. Například dnes běžné přesné určování pozice a sledování pohybu objektů přes GPS by bez gyroskopů nebylo možné.

[20]

Jejich užití je pestré např. k:

- měření náklonu;
- zpřesňování GPS;
- stabilizace obrazu nebo předmětů;
- zjišťování změny polohy nebo pohybu;
- měření setrvačnosti;
- atd.

Základním vztahem popisujícím chování gyroskopu je

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{dI\vec{\omega}}{dt} = I\vec{\alpha} \quad (3)$$

kde $\tau \dots$ vektor točivého momentu gyroskopu
 $L \dots$ vektor úhlového momentu
 $I \dots$ moment setrvačnosti
 $\omega \dots$ vektor úhlové rychlosti
 $\alpha \dots$ vektor úhlového zrychlení.

Lze je rozdělit dle použitého fyzikálního principu:

- mechanické;
- laserový;
- kvantové;
- jaderné;
- elektronické (MEMS);
- optické.

3.2.1 Mechanický gyroskop

Gyroskop je vlastně setrvačník, těžké kolo otáčející se v ložiscích s nepatrným třením. Otáčející se setrvačník má moment hybnosti, takže jeho osa bez působení vnějších sil udržuje stále stejný směr – je to tedy zařízení, které dokáže určit svoji orientaci v prostoru (setrvačník nemění při rotaci svou polohu a tím dává informaci o orientaci dopravního prostředku v prostoru). Obvykle je setrvačník uložen v tzv. kardanových závěsech, má tzv. 3 stupně volnosti). Pro tuto vlastnost je hojně využíván např. v letectví (tzv. umělý horizont), dále jako gyromouse, spaceball, či na lodích atd.

Pokud se v gravitačním poli zavěsí gyroskop na lanko a roztočí, osa otáčení se změní do pravého úhlu k závěsu a gyroskop se otáčí podél osy shodné se směrem působení gravitační síly (každé rotující těleso má snahu dostat se do polohy s největším momentem setrvačnosti, což je v případě rotujícího válce, resp. tenké kruhové desky rotace kolem osy kolmé k ose válce). Tento typ pohybu se nazývá precese. Čím větší je setrvačník a čím rychleji jej roztočíme, tím je precese výraznější. Pevnost osy gyroskopu v prostoru je dána prvním Newtonovým zákonem, který říká, že těleso které je v klidu nebo v pohybu zůstává v setrvačném stavu, dokud na něj nezačne působit síla zvnějšku. Takto i osa gyroskopu, která je ze začátku rychle roztočena, má svou vlastní tendenci ve své rotaci a poloze setrvat.

[20]



Obr. 6 mechanický gyroskop

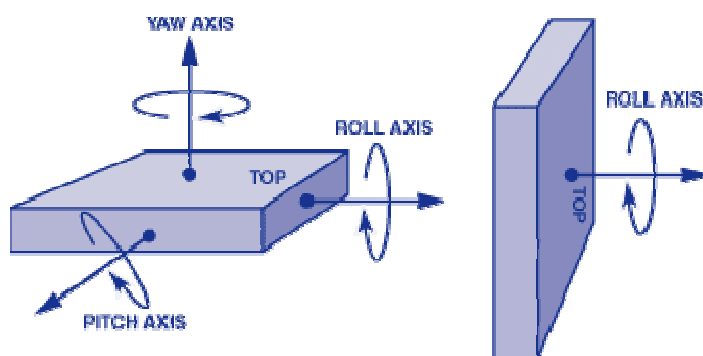
3.2.2 Prstencový laserový gyroskop

Prstencový laserový gyroskop využívá interferenci laserového světla uvnitř optického prstence a zjišťuje změny v orientaci rotace.

3.2.3 Obecný princip gyroskopů MEMS

Gyroskopy jsou obecně určené pro měření úhlové rychlosti, tzn. údaj o tom, jak se měřený objekt rychle otáčí, v jednotkách stupňů/sekundu ($^{\circ}/s$). Rotaci je možné typicky měřit vzhledem k jedné ze tří os z , y , x , někdy označované jako svislá (kolmá) osa (yaw axis), příčná osa (pitch axis) a podélná osa (roll axis) viz. Obr. 7.

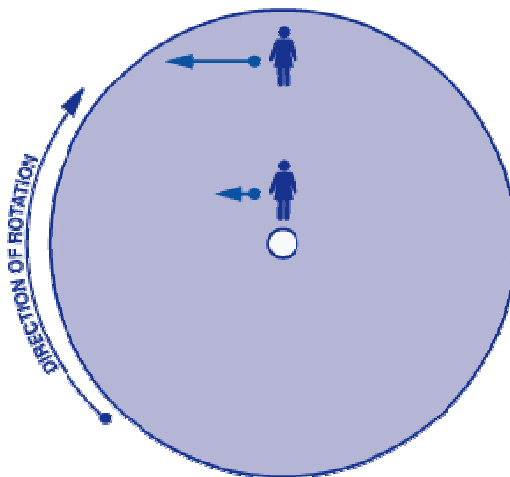
Uváděné gyroskopy, vyráběné jako integrované MEMS obvody pracující na principu Coriolisovy síly, umění měřit pouze v jednom směru - kolmém na plochu čipu (yaw axis). Pro jiné směry je nutné zajistit správné natočení a umístění součástky.



Obr. 7 Možnosti měření natočení a rotace

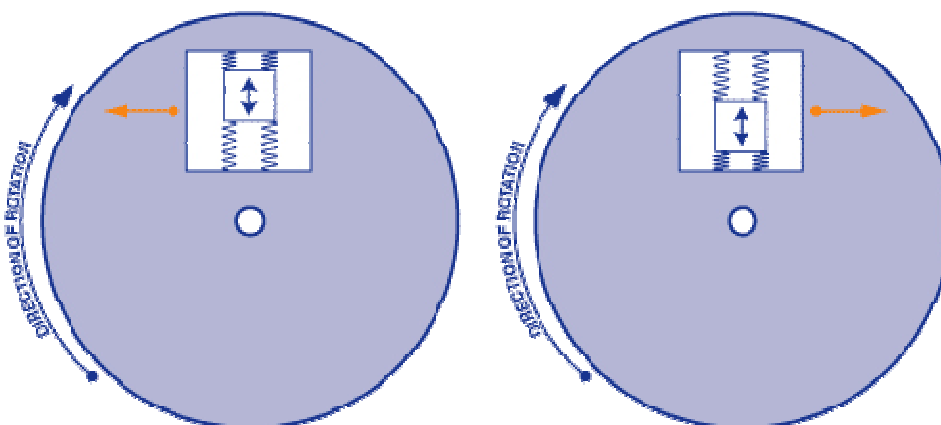
K dobrému pochopení principu dále uvedených senzorů - gyroskopů je nutné si alespoň stručně připomenout, co to je tzv. Coriolisova síla. Základní poučka z fyziky by mohla znít například

takto: Coriolisova síla je tzv. virtuální síla, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí v v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí ω ($F_C = 2 \cdot m \cdot v \times \omega$, kde \times je vektorový součin).



Obr. 8 Příklad působení Coriolisovy síly

Jednodušeji to lze vysvětlit například dle obrázku 8., kde se nějaká slečna pohybuje určitou rychlostí v od středu rotujícího kruhu k jeho okraji. Přitom na ni působí vzrůstající virtuální síla (Coriolisova síla), která má maximální velikost u kraje kotouče. Stejná síla tak působí na všechny hmotné objekty na naší planetě, protože ta je právě takovou soustavou otáčející se pravidelně kolem své osy. Podle vzorce pak na severní polokouli působí (stáčí objekt) ve směru hodinových ručiček, na jižní pak v protisměru. Na rovníku je síla nulová, na pólech maximální. Praktický důsledek lze například pozorovat v točení vírů při odtoku vody z umyvadla nebo u tornáda, vymleté pravé břehy řek nebo více opotřebované pravé kolejnice na jednosměrných železničních tratích.



Obr. 9 Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop

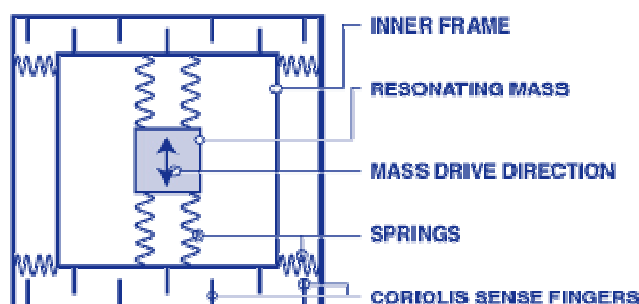
Stejného účinku se pak využívá i v mechanických gyroskopech (viz. Obr. 9). Zde při pohybu objektu, upevněného na pružinách uvnitř rámu, směrem ven (k okraji rotujícího kotouče) na něj působí

Coriolisova síla směrem doleva, při opačném směru pohybu objektu pak doprava. Protože velikost a směr této síly je úměrný i velikosti úhlové rychlosti a směru otáčení, lze tento systém s úspěchem využít pro jejich měření.

[17]

3.2.3.1 Příklad provedení samotného MEMS snímače

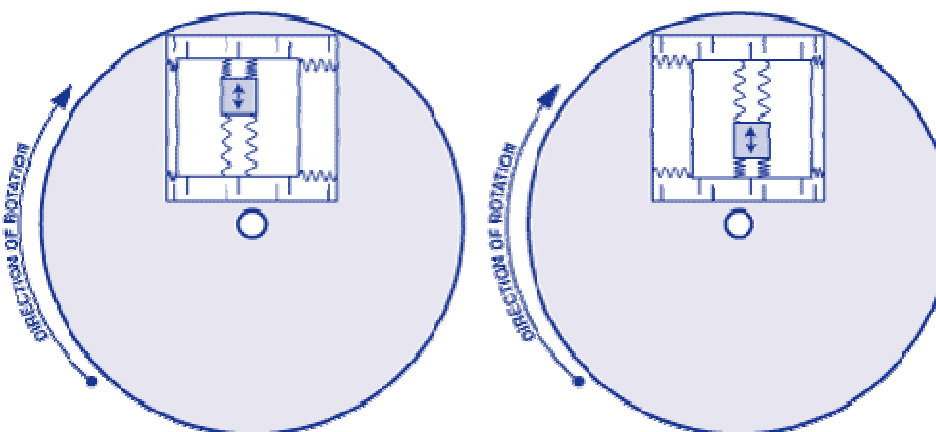
Při praktickém použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech se využívá technologie MEMS, kde se vytváří na čipu spolu s elektrickými obvody i mechanické mikrosoučásti, které tvoří samotný snímač. Různí výrobci sice používají trochu odlišné struktury, ale základní princip je vždy podobný a dá se znázornit obrázkem 10.



Obr. 10 Zjednodušená struktura snímače MEMS gyroskopu

Základ tvoří rezonující struktura (resonating mass) upevněná v rámu (inner frame), která se vlivem vlastní mechanické rezonance, zde reprezentované pružinami (springs), pohybuje v uvedeném směru (Mass drive direction) - kolmém na směr otáčení (viz. Obr. 11). Přitom vzniká Coriolisova síla úměrná úhlové rychlosti otáčení, která stlačí vnější pružiny rámu a způsobí vzájemný posuv měřících plošek (Coriolis sense fingers) fungujících jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstup je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení $^{\circ}/s$.

[17]



Obr. 11 Příklad funkce struktury gyroskopu při rotaci

3.3 Magnetické senzory

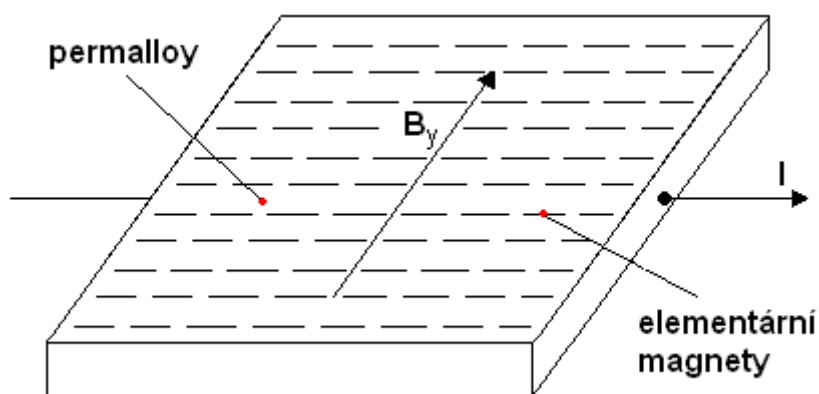
3.3.1 Magnetorezistivní sondy

Rezistory závislé na magnetickém poli dokážou totéž co Hallovy sondy. Nejčastější použití jsou senzory přiblížení.

Nejvíce používaným materiálem je polovodičová destička, často InSb, ve kterém jsou příměsi NiSb. Bez magnetického pole prochází proud polovodičem nejkratší cestou. Když začne působit magnetické pole, proud se stranově vychýlí, musí urazit delší dráhu, a destička vykáže větší odpor.

Magnetorezistory mají, na rozdíl od Hallova čidla, pouze dva vývody. Jsou to odpory závislé na velikosti vnějšího magnetického pole.

Existuje však i provedení, kdy je destička vyrobena z feromagnetického materiálu – permalloy. Tento materiál je během výroby tak zpracován, že elementární magnety mají jednu přednostní orientaci v podélném směru pásu (Obr. 12).



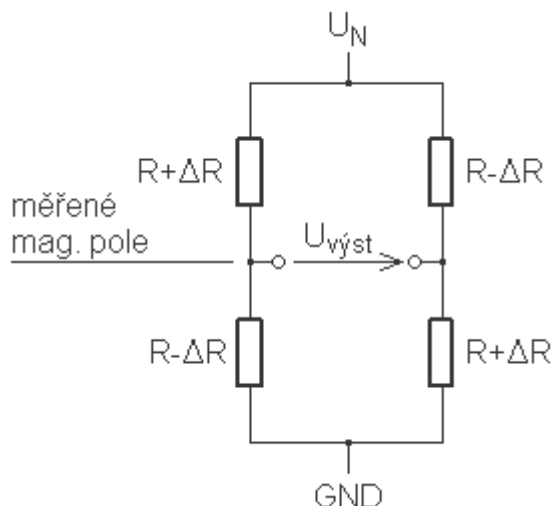
Obr. 12 Magnetorezistivní čidlo z materiálu permalloy

Bez magnetického pole je odpor pásu nejmenší. Jakmile se indukce pole začne zvětšovat, bude odpor klesat. Díky rozměrům a konstrukci pásu je tato závislost v určitém rozsahu přijatelně lineární.

Magnetorezistory jsou často používány v zapojení do můstku, jak je to znázorněno na obr. 13. Uspořádání rezistorů je takové, aby v jedné větvi byly zapojeny proti sobě, tj. aby změnou magnetického pole jeden z rezistorů zvětšil hodnotu odporu, zatímco druhý ji zmenšil. Výsledné napětí

$$U_{výst} = \frac{-U_N}{R} \cdot \Delta R, \quad (4)$$

kde ΔR je změna odporu vlivem magnetického pole.



Obr. 13 Měření magnetického pole

Použití:

- měření magnetických polí;
- měření magnetického pole Země, výroba kompasů apod.;
- měření magnetického proudu;
- detekce projíždějících vozidel v dopravě.

[5], [7], [8]

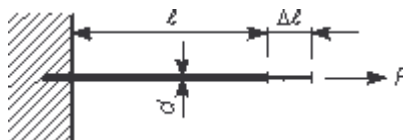
3.4 Tlakové elektronické senzory

Do této skupiny jsou zařazeny takové snímače tlaku, které poskytují elektrický výstupní signál. Jedná se vesměs o moderní a perspektivní snímače doplněné moderními elektronickými vyhodnocovacími obvody.

[18]

3.4.1 Snímače s odporovými tenzometry

Odporový tenzometr je odporový senzor, u něhož se využívá tzv. piezorezistivního jevu. Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám jejich elektrického odporu. Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti Hookova zákona a jsou zpravidla vyvolány tlakem nebo tahem. Při deformaci vodičů a polovodičů dochází ke změnám geometrických rozměrů a ke změnám krystalografické orientace, které vedou ke změně odporu.



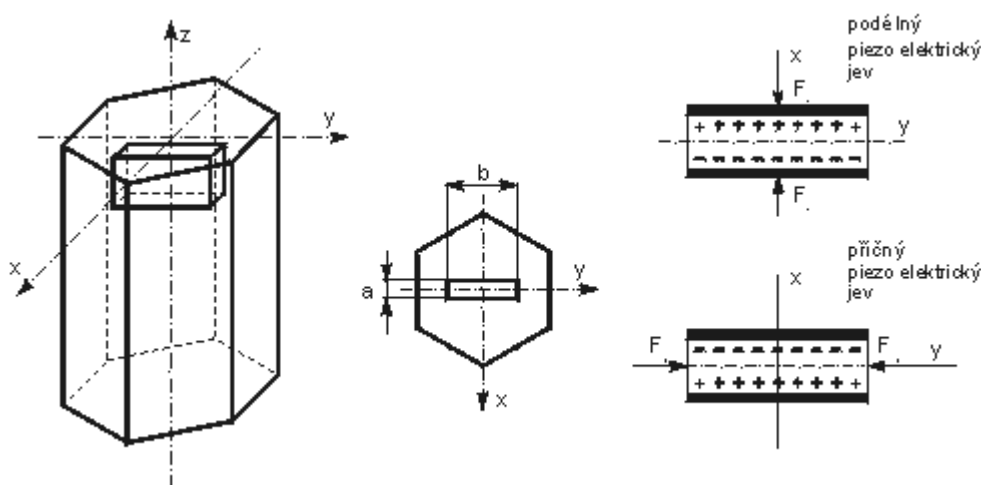
Obr. 14 Princip tenzometru

Princip odporového tenzometrického snímače je znázorněn na Obr. 14. Je to deformace odporového drátku o délce l , průřezu S (průměru d) a měrném odporu ρ , který je podroben účinku síly F tak, že se prodlouží o délku Δl .

[18]

3.4.2 Piezoelektrické snímače tlaku

Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje. Tento děj je reciproký; přiložením střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Uvedené vlastnosti vykazuje např. křemen, titaničitan barnatý a olovnatý, některé makromolekulární látky a jiné. V praxi se nejčastěji využívá vlastností SiO_2 a BaTiO_3 . Piezoelektrický element získáme z krystalu křemene (Obr. 15) tak, že vyřízneme destičku, jejíž hrany budou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (X - osa elektrická, Y - osa mechanická, Z - osa optická). Působí-li síla kolmo na optickou osu, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na elektrickou osu se objeví elektrický náboj.



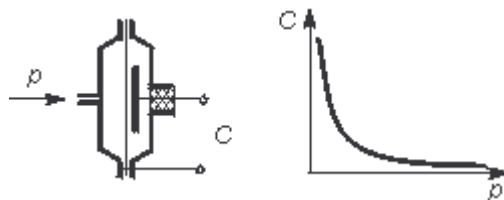
Obr. 15 Piezoelektrický jev u krystalu křemene

Působí-li na křemennou destičku rovnoměrně rozložená síla F_x podél elektrické osy X (Obr. 15), hovoříme o tzv. podélném piezoelektrickém jevu a náboj Q , vzniká na každé stěně, kolmé k elektrické ose.

[18]

3.4.3 Kapacitní snímače tlaku

Základem kapacitního snímače je dvou nebo víceelektrový systém, jehož parametry se mění v důsledku působení měřené neelektrické veličiny.



Obr. 16 Kapacitní snímač

Jak je patrné z průběhu charakteristiky na obr. 16, je průběh charakteristiky nelineární. Poněvadž se jedná o hyperbolickou závislost, budou změny kapacity, a tím i citlivost, největší při malých mezerách elektrod.

[18]

3.4.4 Smart převodníky tlaku

Smart-převodníky se v současné době používají nejen u snímačů tlaku, ale i u dalších provozních veličin. Ačkoliv se inteligentní převodníky pro jednotlivé měřené veličiny v detailech liší, mají celou řadu vlastností společných a bude o nich ještě zmínka v kapitole o měření teploty. Většina inteligentních převodníků tlaku využívá senzorů s elektrickým principem a je charakterizována aplikací mikroprocesorů a miniaturních elektronických obvodů, které slouží pro ukládání důležitých údajů do paměti. Jedná se o údaje o měřicím rozsahu, kalibraci, nastavení signalizačních mezí apod. Software, využívaný pro řízení procesu měření, umožňuje i automatickou diagnostiku funkce zařízení, ukládání naměřených dat do paměti, vyhodnocování extrémních i průměrných hodnot atd. Důležitou vlastností inteligentních převodníků je jejich konfigurovatelnost podle požadavků uživatele. K dálkovému přenosu lze využít podle přání unifikovaného, analogového či digitálního signálu.

Smart převodníky jsou prosté driftu nulové linie, perioda pro nutnou kalibrační kontrolu je výrazně delší než u klasických přístrojů. Zatím jsou cenově dražší, ale představují moderní technické prostředky řízení technologického procesu.

[18]

4 Parametry a dostupnost senzorů

Senzorů nabízených různými firmami se dá najít velké množství. Ne všechny ovšem splňují požadavky na přesnost, cenu a hlavně dostupnost. V této kapitole jsem chtěl uvést aktuálně vystavované senzory různých výrobců.

4.1 Přehled některých elektronických akcelerometrů

Elektronické akcelerometry byly nejdostupnější od výrobců: Freescale (začínající MMA), Analog Devices (začínající AD) a STMicroelectronics (začínající LIS). Všechny tyto akcelerometry jsou již standardně v tříosém provedení. Liší se hlavně v typu výstupního signálu (analogový, digitální), rozsahem měření ($\pm 1,5g$ až $\pm 24g$), citlivostí a hlavně cenou. Nejpoužívanějšími sběrnici digitálních akcelerometrů jsou I²C a SPI.

Tab. 1 Přehled akcelerometrů

Název	Počet os	Typ výstupu	Napájení [V]	Rozsah měření	Sběrnice	Citlivost	Cena
LIS352AX	3	analogový	2.4 až 3.6	$\pm 2g/\pm 6g$	-	Vdd/5	-
LIS331DLH	3	digitální	2.16 až 3.6	$\pm 6g/\pm 12g/\pm 24g$	I ² C/SPI	3mg/LSB	-
ADXL345	3	digitální	2.0 až 3.6	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$	I ² C/SPI	4mg/LSB	€7.99
ADIS16240	3	digitální	2.4 až 3.6	$\pm 18g$	SPI	51.4mg/LSB	€21
MMA7260QT	3	analogový	2.2 až 3.6	$\pm 1.5g/\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g$	-	800mV/g	-
MMA7455	3	digitální	2.4 až 3.6	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$	I ² C/SPI	15.6mg/LSB	€5.80
MMA7660FC	3	digitální	2.4 až 3.6	$\pm 1.5g$	I ² C	48mg/LSB	€1.53

Nejlevnější nalezený akcelerometr je MMA7660FC o rozměrech pouzdra 3 x 3 x 1 mm. Je určen pro měření nízkých zrychlení do $\pm 1,5g$. Jeho použití bude především v elektronických přístrojích jako např. mobilní telefony a fotoaparáty, kde snímá aktuální naklopení zařízení.

4.2 Přehled některých elektronických gyroskopů

Nejdostupnější gyroskopy jsem našel od výrobců: Analog Devices (začínající AD) a STMicroelectronics (začínající L). Většina těchto gyroskopů jsou citlivé jen v jedné nebo dvou osách a má analogový výstupní signál. Tříosé gyroskopy s velkou citlivostí jsou mnohonásobně dražší. Vybrané gyroskopy těchto dvou výrobců se liší napájecím napětím, kde gyroskopy firmy Analog Devices vyžadují 5V napájení oproti 3V firmy STMicroelectronics. Rozsahy měření senzorů je od $\pm 80^\circ/s$ až po $\pm 2000^\circ/s$.

Tab. 2 Přehled gyroskopů

Název	Počet os	Typ výstupu	Napájení [V]	Rozsah měření	Sběrnice	Citlivost	Cena
L3G4200D	3	digitální	2.4 až 3.6	$\pm 250/\pm 500s/\pm 2000$ °/s	I ² C/SPI	0.00875°/s/LSB	-
LPR530AL	2	analogový	2.7 až 3.6	± 300 °/s	-	3.3mV/°/s	€ 6
LY530ALH	1	analogový	2.7 až 3.6	± 300 °/s	-	3.3mV/°/s	€ 6
ADIS16260	1	digitální	4.75 až 5.25	$\pm 80/\pm 160s/\pm 320$ °/s	SPI	0.0183°/s/LSB	€ 112
ADXRS610	1	analogový	4.75 až 5.25	± 300 °/s	-	6mV/°/s	€ 114

Při použití jednoosých gyroskopů (osa kolmá na senzor) pro měření náklonu ve všech třech osách je nutno zkonstruovat modul, který bude mít umístěny tři jednoosé gyroskopy v daných osách. Toto řešení je konstrukčně náročné jak na výrobu, tak na tuhost modulu.

Proto se využívá kombinace jednoosého a dvouosého gyroskopu. Jednoosý gyroskop snímá v ose Z a dvouosý v osách X a Y. Tudíž vše můžeme umístit na jeden plošný spoj.

5 Sběrnicový systém

Ke komunikaci mezi integrovanými obvody, případně ke komunikaci mezi mikropočítačovými moduly na krátkou vzdálenost. Typická délka vedení zde nepřesahuje jednotky metrů. Často používaná rozhraní pro komunikaci mezi jednotlivými IO jsou rozhraní Microwire, SPI a I2C.

Důvodem používání sériové komunikace mezi jednotlivými obvody je především zmenšení počtu vývodů jejich pouzder. Při použití sériových pamětí se zredukuje množství adresních, datových a řídicích vývodů obvyklé (nikoliv sériové) paměti na tři až čtyři vývody. To umožňuje zmenšit rozměry pouzdra i spojové desky, protože odpadá prostorově náročné propojování velkým počtem vodičů.

Další výhodou může v některých případech být možnost připojení obvodů se sériovým rozhraním i k mikrokontrolérům bez vyvedené vnitřní sběrnice, v krajním případě i bez příslušného řadiče sériového rozhraní. Funkce řadiče je potom realizována programově s využitím několika vývodů vhodného portu mikrokontroléru. Nelze tak většinou dosáhnout plné rychlosti daného rozhraní, ale tato skutečnost nemusí být v některých případech na závadu.

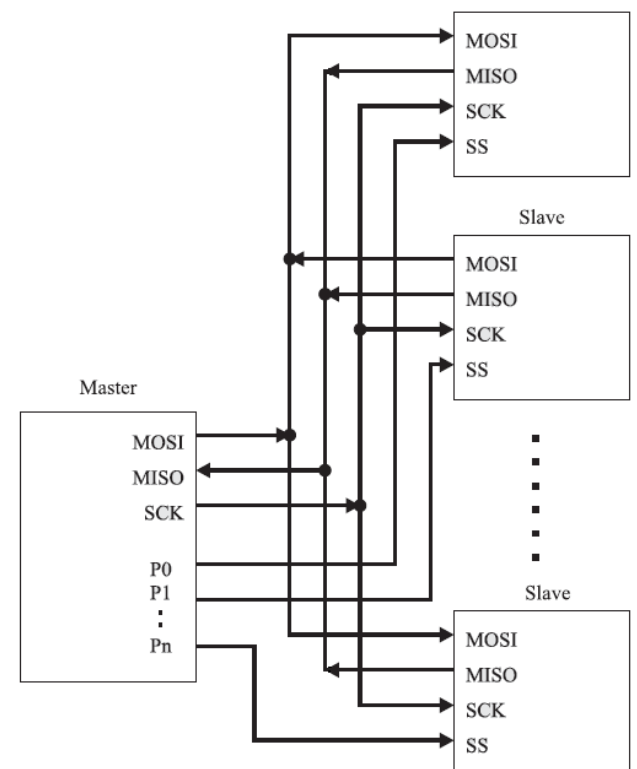
[9]

5.1 Rozhraní SPI

SPI (*Seriál Peripheral Interface*) je sériové periferní rozhraní. Rozhraní SPI je určeno především pro připojení vnějších pamětí, A/D převodníků a dalších obvodů k mikrokontroléru, případně pro vzájemnou komunikaci mezi mikrokontroléry. U některých mikrokontrolérů je SPI využíváno i pro programování jejich vnitřní paměti Flash. Základní koncepce systému využívajícího sběrnici SPI je následující (viz Obr. 17):

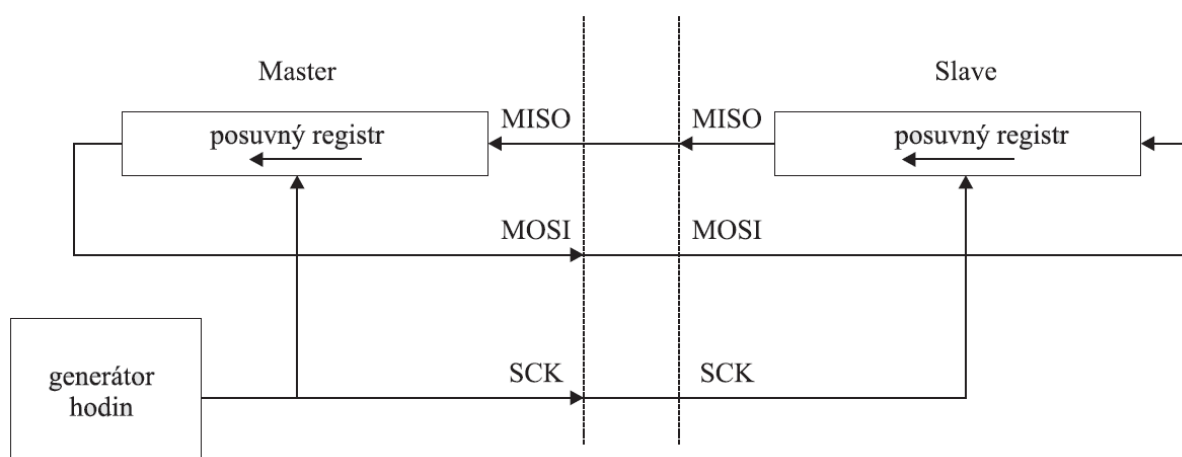
V systému mohou být zapojeny dva nebo více obvodů. Jeden z obvodů, obvykle procesor, je typu Master, ostatní jsou typu Slave. Jednotlivé obvody jsou propojeny čtyřmi vodiči:

- Datový výstup MOSI (Master Out, Slave In) obvodu Master je připojen na vstupy MOSI všech obvodů Slave.
- Datový vstup MISO (Master In, Slave Out) obvodu Master je propojen s výstupy MISO všech obvodů Slave.
- Výstup hodinového signálu SCK je připojen na vstupy SCK všech obvodů Slave.
- Každý obvod Slave má vstup SS (Slave Select) pro výběr obvodu. Je-li SS v neaktivní úrovni, je rozhraní SPI daného obvodu neaktivní a jeho výstup MISO je ve vysokoimpedančním stavu. Vstupy SS jednotlivých obvodů jsou samostatnými vodiči propojeny s obvodem Master. Je-li obvodem Master mikrokontrolér, bývají tyto vodiče připojeny k některému z jeho portů. Tak lze snadno vybírat obvod, se kterým má být v daném okamžiku vedena komunikace.



Obr. 17 Celková koncepce systému se sběrnici SPI

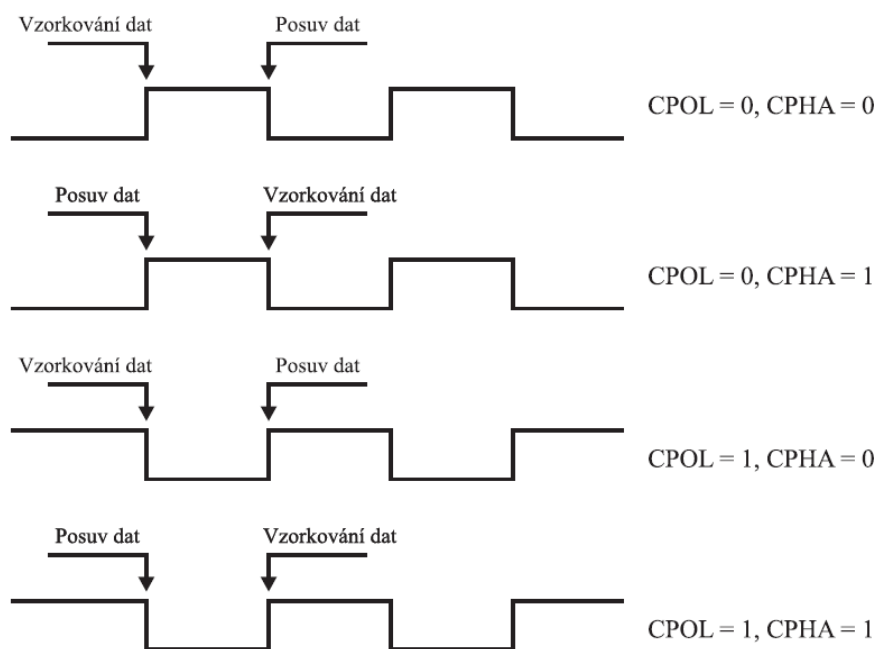
Přenosy na sběrnici SPI, probíhají vždy mezi obvodem Master a některým z obvodů Slave. Oba obvody obsahují posuvné registry, které jsou v okamžiku komunikace propojeny tak, jak je schematicky naznačeno na Obr. 18.



Obr. 18 Propojení stanic Master a Slave

Obvod Master generuje hodinový signál, který řídí posouvání obou posuvných registrů. Klidová úroveň signálu SCK a vztah mezi datovým a hodinovým signálem je dán parametry CPOL a

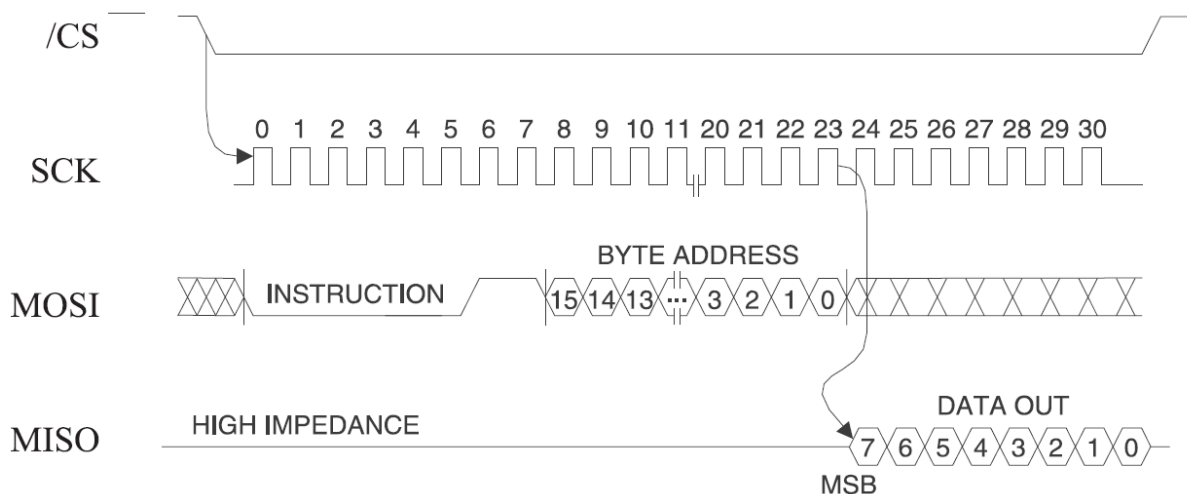
CPHA (viz Obr. 19). Pokud je rozhraní SPI realizováno specializovaným řadičem, je obvykle možné tyto parametry v řadiči nastavit. Je-li, rozhraní SPI realizováno programově, musí být okamžiky změny úrovně datových a hodinových signálů zvoleny tak, aby přijímající obvod vzorkoval ustálená data.



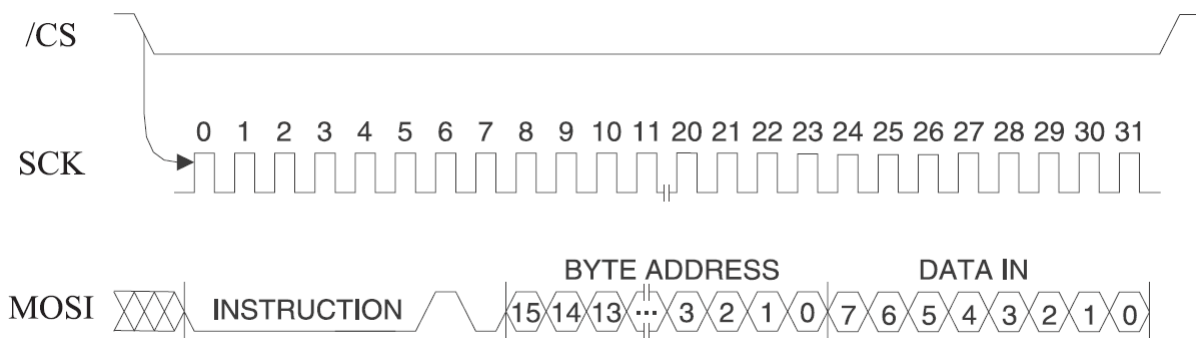
Obr. 19 Význam parametrů CPOL a CPHA na sběrnici SPI

Napěťové úrovně jednotlivých signálů rozhraní SPI, jsou dané použitou technologií. Maximální frekvence hodinového signálu je 2 MHz.

Na Obr. 20 a Obr. 21 je příklad komunikace se sériovou pamětí při čtení dat. Mikrokontrolér musí nejprve do paměti zapsat povel (čtení) a adresu dat. Potom jsou z paměti přečtena příslušná data.



Obr. 20 Čtení dat z paměti s rozhraním SPI

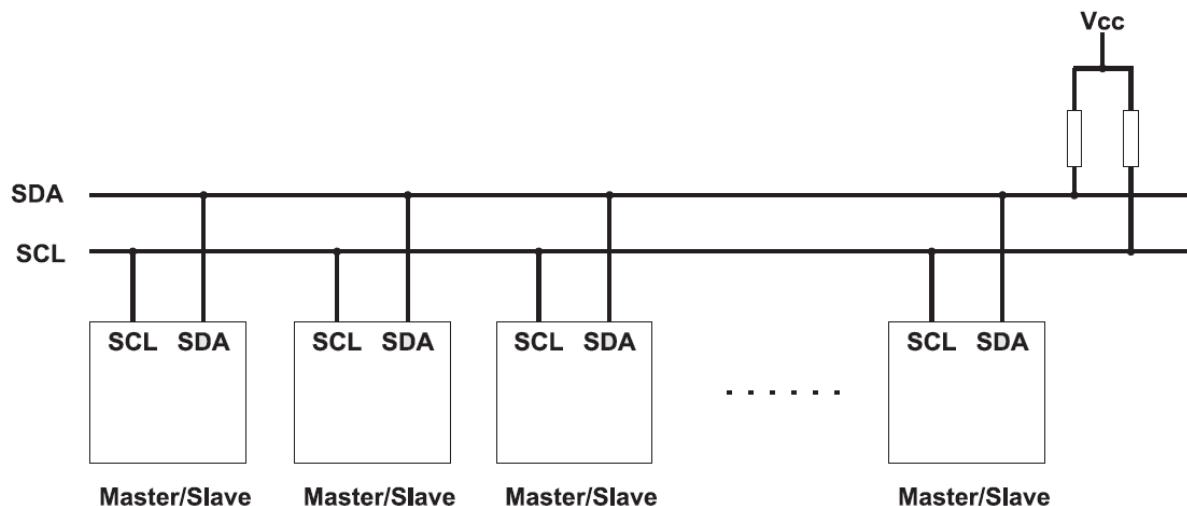


Obr. 21 Zápis dat do paměti s rozhraním SPI

[9]

5.2 Rozhraní I²C

Na rozdíl, od SPI a Microwire, je I²C sběrnice typu multimaster. Řeší proto i arbitraci pro přístup na sběrnici a má zabudovaný mechanismus adresování jednotlivých připojených stanic nebo integrovaných obvodů. Základní koncepce sběrnice I²C je na Obr. 22. Každá stanice má určenou svou vlastní adresu o délce 7 nebo 10 bitů, která slouží k jejímu výběru i k arbitraci.



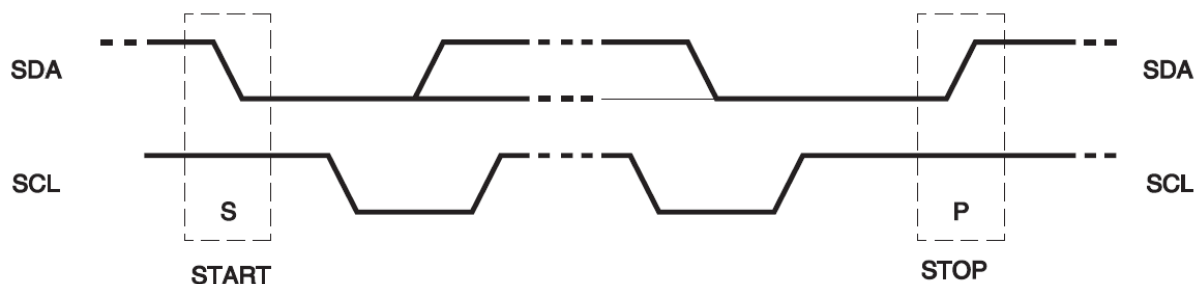
Obr. 22 Celková koncepce sběrnice I²C sběrnice

[9]

5.2.1 Fyzická vrstva

Jednotlivé stanice rozhraní I²C jsou propojeny jedním datovým vodičem (SDA) a jedním hodinovým vodičem (SCL). Z elektrického hlediska jsou oba vodiče typu otevřený kolektor. Jejich maximální délka je dána jejich nejvyšší přípustnou kapacitou 400 pF.

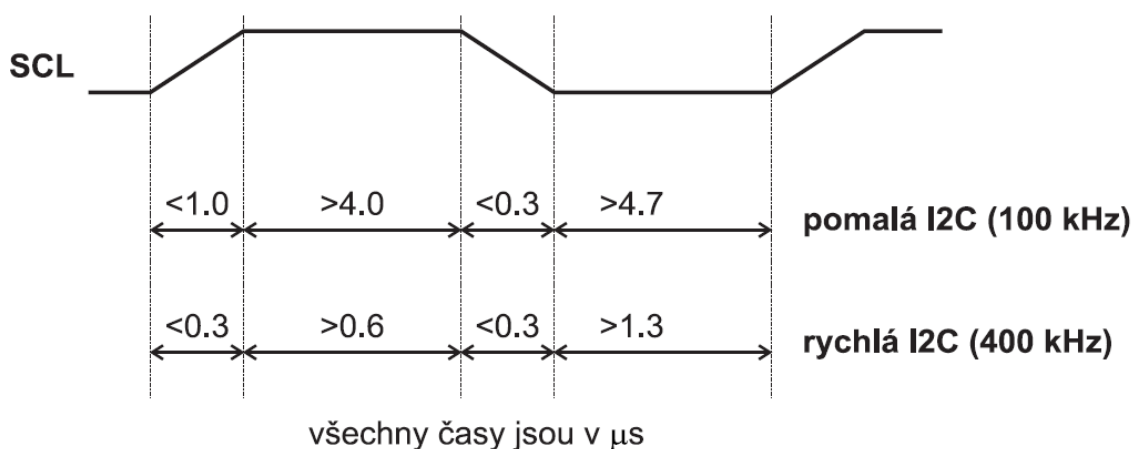
V klidovém stavu (volná sběrnice) jsou oba vodiče v úrovni H. Při probíhajícím přenosu jsou na SDA vysílány jednotlivé datové bity, přičemž platí pravidlo, že logická úroveň na SDA se smí měnit pouze, je-li SCL v úrovni L. Toto pravidlo je porušeno ve dvou speciálních případech – vysílání podmínek START a STOP, které se používají k zahájení arbitrace a k ukončení přenosu (viz Obr. 23).



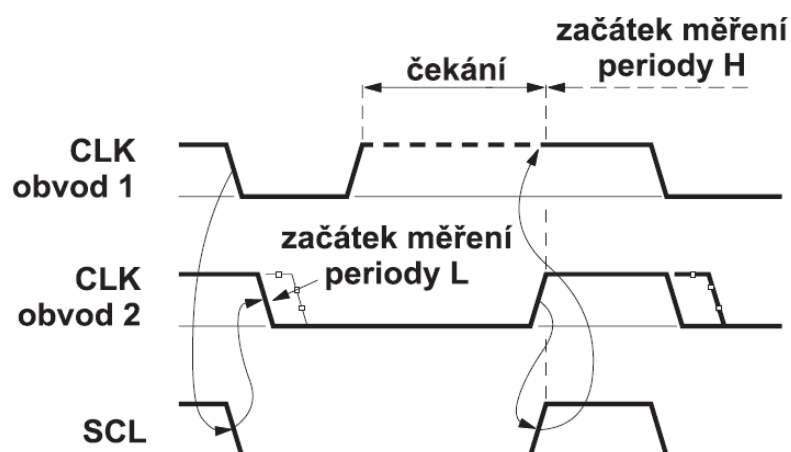
Obr. 23 Podmínky START a STOP

Maximální přípustná frekvence signálu SCL je podle verze I²C 100 kHz nebo 400 kHz. Pro obě frekvence je specifikována minimální povolená doba setrvání SCL v úrovni L i H (viz Obr. 23). Při arbitraci i při přenosu dat si jednotlivé stanice synchronizují generátory hodin tak, že trvání úrovně H na SCL je odměřováno vnitřním časovačem každé stanice až od okamžiku, kdy SCL skutečně úrovně H dosáhne (protože je SCL typu otevřený kolektor, může být v úrovni L držen i v situaci kdy se daná stanice snaží nastavit úroveň H). Podobně je doba trvání úrovně L na SCL odměřována od sestupné hrany (viz Obr. 25).

Tento mechanismus umožňuje některé ze stanic zpomalit přenos: pomalá stanice může podržet po určitou dobu signál SCL v úrovni L a tím zabránit vysílající stanici ve vyslání dalšího bitu.



Obr. 24 Časování signálu SCL na I²C

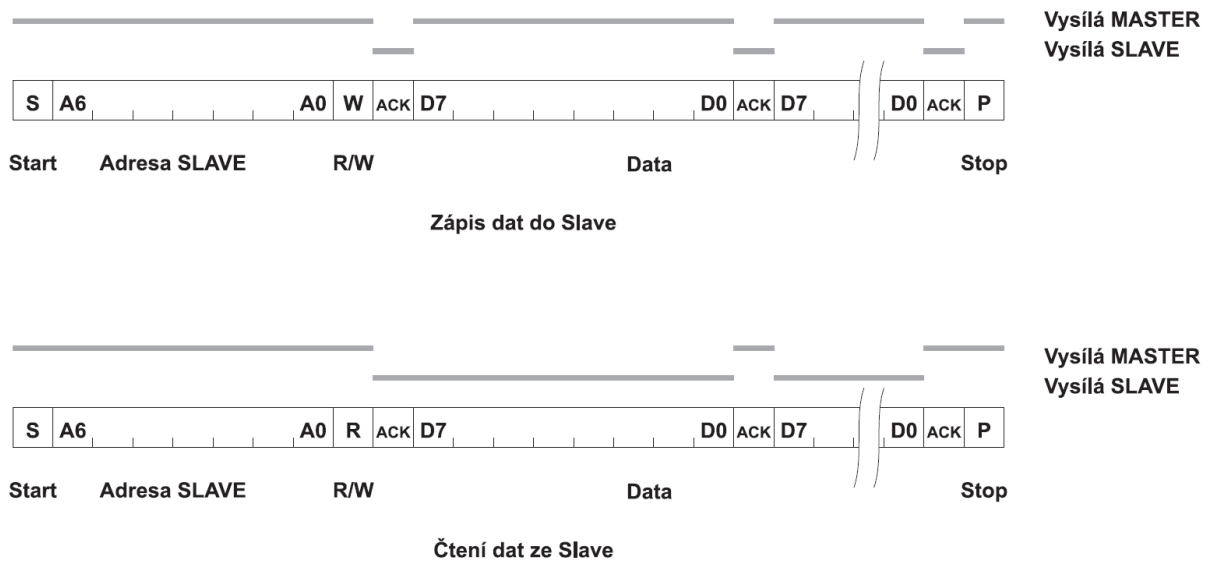


Obr. 25 Synchronizace hodin SCL

[9]

5.2.2 Linková vrstva

Formát rámce se sedmibitovou adresou při přenosu na I2C je na Obr. 26. Každému přenosu předchází vyslání podmínky START. Potom je vysílána 7bitová adresa příjemce a jeden bit R/W, který indikuje požadovanou operaci (čtení/zápis). Další bit ACK je vysílán s úrovní H a je určen k potvrzení přijímací stanicí. Dále jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý byte je následován jedním bitem ACK. Po ukončení přenosu je vysílána podmínka STOP.

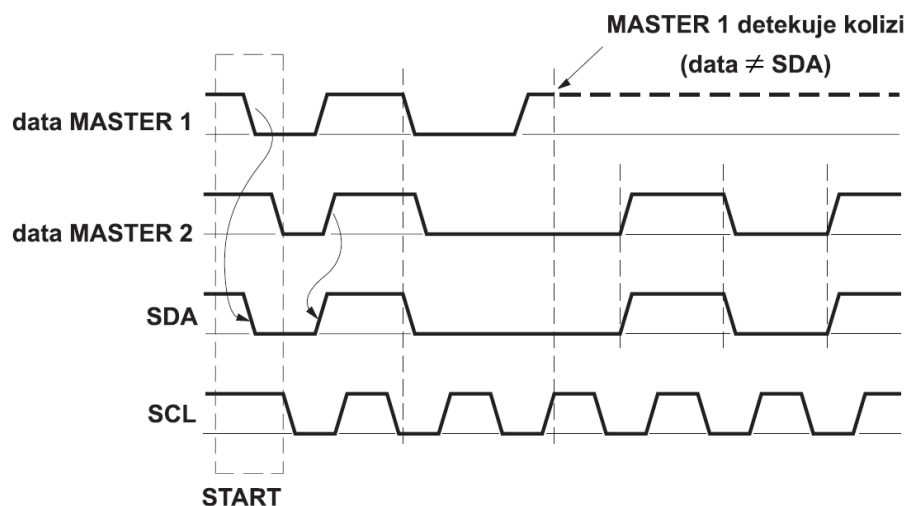


Obr. 26 Formát rámců na sběrnici I²C

[9]

5.2.2.1 Arbitrace

Pro arbitraci se na I2C používá metoda s detekcí kolize. Každá ze stanic může zahájit vysílání, je-li předtím sběrnice v klidovém stavu. Během vysílání musí neustále porovnávat vysílané bity se skutečným stavem SDA. Je-li zjištěn rozdíl mezi očekávaným a skutečným stavem linky SDA, je to indikace kolize mezi několika stanicemi. Vzhledem k charakteru sběrnice (otevřená kolektory) může k této situaci dojít, pokud určitá stanice vysílá úroveň H, zatímco jiná stanice vysílá úroveň L. Stanice, která na lince zjistí úroveň L, zatímco sama vysílá H, musí vysílání okamžitě ukončit (viz Obr. 27).



Obr. 27 Arbitrace na I²C. Master1 ztrácí právo na sběrnici

K arbitraci většinou dochází během vyslání několika prvních bitů, kdy je vysílána adresa přijímací stanice. Pokud by se např. dvě stanice současně pokusily o zápis do stejného obvodu, nastane kolize až při přenosu vlastních zapisovaných dat. V krajním případě, kdy několik stanic současně zapisuje stejná data na stejnou adresu, nemusí být kolize vůbec detekována.

[9]

5.2.2.2 Adresování

Každá stanice (v praxi např. každý integrovaný obvod) připojená na I²C má přidělenou 7bitovou adresu. Po zachycení podmínky START porovnávají všechny obvody svou adresu s adresou, která je vysílána na sběrnici. Zjistí-li některý z obvodů shodu, je vysílání určeno právě jemu a musí přijetí adresy potvrdit bitem ACK. Potom přijímá, resp. vysílá další data.

V praxi je většinou několik adresních bitů jednotlivých obvodů určeno už při výrobě. Zbývající bity se volí pomocí příslušných vývodů daného obvodu, které se podle potřeby připojí na úroveň L nebo H.

Několik adres je na I²C vyhrazeno pro speciální účely. Např. adresa 0000000 je určena pro vysílání „broadcast“, adresy 0000011, 00001XX a 11111XX jsou rezervovány pro další účely.

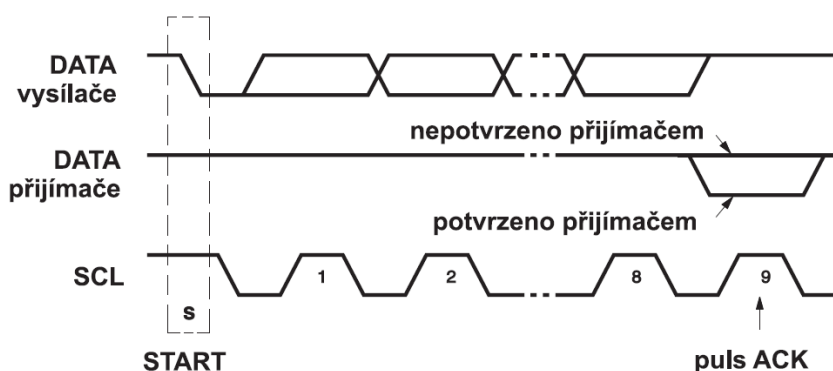
Adresa 11110aa indikuje 10bitové adresování: aa zde označuje dva nejvyšší bity adresy stanice, zbývajících 8 bitů je vysíláno v následujícím bytu.

Popisované adresování se týká adresy jednotlivých stanic na I²C. Je-li stanicí např. paměťový obvod, jedná se o adresu celého obvodu. Adresa jednotlivých slov v paměti a požadovaná operace se do paměti přenáší v datové části rámce I²C.

[9]

5.2.2.3 Potvrzování

Každý vysílaný byte (včetně adresy) je následován vysláním jednoho bitu ACK. Vysílající stanice vysílá bit ACK v úrovni H. Přijímající stanice potvrzuje přijetí tím, že v době vysílání ACK připojí SDA na úroveň L (viz Obr. 28). Pokud vysílající stanice nedostane potvrzení příjmu, ukončí vysílání podmínkou STOP.



Obr. 28 Potvrzování příjmu bitem ACK

[9]

5.2.3 Praktická realizace

Rozhraní I²C uvedla firma Philips pro účely propojování různých obvodů ve výrobcích spotřební elektroniky. Obvody se většinou připojují k mikrokontrolérům, které jsou vybavené příslušným řadičem. Čistě programová realizace I²C přichází v úvahu pouze ve zjednodušené situaci, kdy je zapotřebí k určitému mikrokontroléru připojit jeden nebo více obvodů s tímto rozhraním. Programové řešení všech vlastností I²C včetně arbitrace, kontroly bitů ACK, synchronizace SCL atd. by vyžadovalo rychlé vzorkování signálů SCL a SDA. K tomu by byl zapotřebí dostatečně výkonný mikrokontrolér, který by byl realizací I²C značně zatížen.

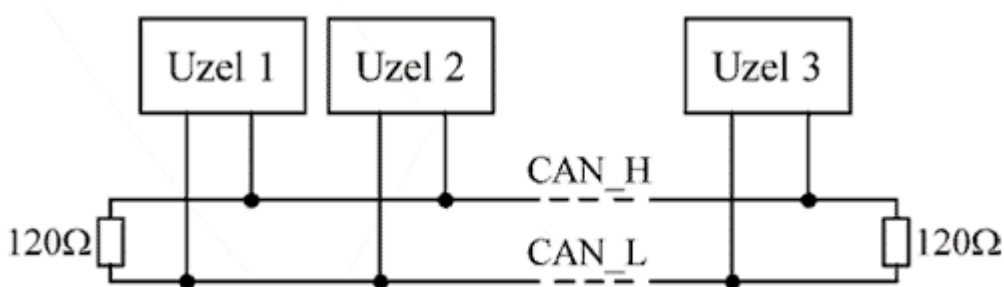
[9]

5.3 Sběrnice CAN

Rostoucí množství elektrických zařízení ve vozidle většinou ovládaných z přístrojové desky vyžadovalo velkého počtu kabelových forem. Proto se pro přenos dat mezi četnými subsystémy automobilu začala používat digitální sběrnice. Začátkem 90. let byla firmou Bosch navržena speciální sběrnice pro automobilové aplikace CAN, která se velmi rychle rozšířila. Řízení pomocí sběrnice CAN je řešeno tak, že vždy skupina podobných nebo blízkých systémů (např. skupina zadních světel, skupina spotřebičů levých předních dveří apod.) je připojena na tzv. řídicí jednotku neboli procesor komunikující po sběrnici CAN. Mezi řídicí jednotkou a jednotlivými prvky je přímé propojení pomocí vodičů. Vedle snížení množství kabelů umožnilo zavedení sběrnice CAN lepší funkci mnoha asistenčních systémů. Nyní je také možné použít efektivnější přístupy k diagnostice subsystémů vozidla a pro životně důležité systémy provádět průběžnou diagnostiku během provozu.

Datová komunikační síť CAN původně používala modifikované rozhraní RS 485, později bylo definováno normou ISO. Tato norma uvádí specifikaci elektrického rozhraní (fyzická vrstva) a specifikaci datového protokolu (linková vrstva).

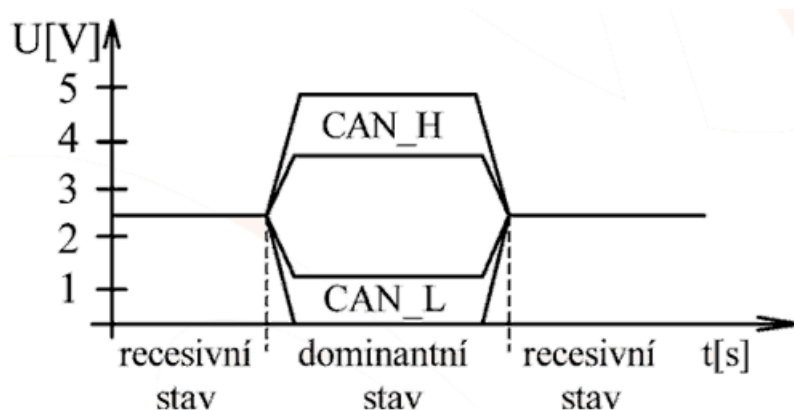
Přenosovým prostředkem je sběrnice tvořená dvou vodičovým vedením, jehož signálové vodiče jsou označeny CAN_H a CAN_L, a zakončovacemi rezistory 120 Ω. K této sběrnici se připojují jednotlivé komunikační uzly obr. 29. Počet těchto uzlů může být až 110 (dle typu budičů CAN).



Obr. 29 Principiální schéma sběrnice CAN

Sběrnici se přenáší dva logické stavy: aktivní (dominant - dominantní) a pasivní (recessive - recesivní), přičemž dominantní stav představuje log. 0, recesivní stav log. 1. Sběrnice je

v dominantním (aktivním) stavu, je-li alespoň jeden její uzel v dominantním stavu. V recesním (pasivním) stavu je sběrnice tehdy, když všechny její uzly jsou v recesním stavu. V recesním stavu je rozdíl napětí mezi vodiči CAN_H a CAN_L nulový. Dominantní stav je reprezentován nenulovým rozdílem napětí. Spínače signálových vodičů jsou konstruovány tak, aby v dominantním stavu na vodiči CAN_H bylo napětí v rozsahu 3,5 až 5V, na vodiči CAN_L napětí v rozsahu 0 až 1,5V. V recesivním stavu je napětí vodičů CAN_H a CAN_L stejné a je zajištěno odporovou sítí na vstupu přijímače. Na obr. 30 je na časové ose průběhu signálu znázorněno toleranční pásmo napěťových úrovní logických stavů na sběrnici CAN. Je též patrné, že signálové vodiče CAN_H a CAN_L jsou vzájemně logicky invertované.

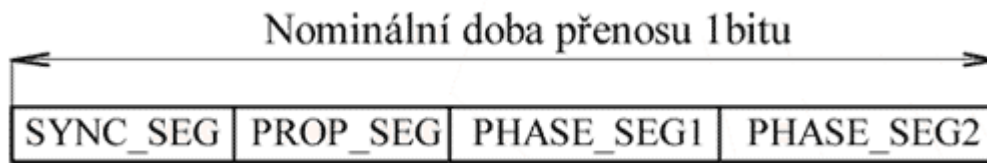


Obr. 30 Toleranční pásmo napěťových úrovní logických stavů na sběrnici CAN

Maximální rychlost přenosu je 1Mbit/s při délce sběrnice do 40m. Při délce 130m klesá na 500kbit/s, pro délku 560m na 125kbit/s a při délce 3,3km je její hodnota jen 20kbit/s.

Komunikace na sběrnici CAN probíhá tak, že každý uzel může za určitých okolností využívat sběrnici pro vysílání svých zpráv. Zpráva vysílaná po sběrnici obsahuje identifikační číslo vysílajícího uzlu. Identifikátor definuje nejen obsah zprávy, ale i prioritu přístupu na sběrnici. Tímto způsobem je možno zaslat zprávu z jednoho uzlu do jiného uzlu nebo několik jiných uzlů současně. Komunikační síť CAN může pracovat jak v režimu multi-master (více nadřízených uzlů), nebo v režimu master-slave (jeden uzel nadřízený a více podřízených uzlů).

Pro udržení synchronizace mezi uzly CAN během přenosu zpráv se používají změny úrovně signálu na sběrnici. Doba trvání jednoho informačního bitu se dělí na čtyři časové segmenty obr. 31. Každý segment se dělí na časová kvanta. Během SYNC_SEG se očekává hrana signálu. PROP_SEG slouží ke kompenzaci doby šíření signálu po sběrnici. PHASE_SEG1 a PHASE_SEG2, mezi kterými se nachází vzorkovací bod stavu sběrnice, se využívají ke kompenzaci fázových chyb na sběrnici. Je-li očekávána hrana signálu mimo SYNC_SEG, mění se jejich délka o programovatelný počet časových kvant. Aby se tento způsob kompenzace mohl realizovat bez vlivu na obsah přenášených zpráv, je použita metoda doplnění bitů opačné polaritou. Obsahuje-li zpráva 5bitů se stejnou polaritou, zařadí se automaticky do řetězce bitů bit s opačnou polaritou, který se na přijímací straně opět vyřadí.



Obr. 31 Přenos jednoho informačního bitu v síti CAN

Komunikační protokol CAN definuje formát přenášených zpráv na aplikační úrovni. Zprávy jsou přenášeny v tzv. rámcích. V definici CAN jsou určeny čtyři typy rámců:

- datový rámeček (DATA FRAME);
- žádost o data (REMOTE FRAME)
- chybový rámeček (ERROR FRAME);
- rámeček přetížení (OVERLOAD FRAME).

Norma pro protokol CAN uvádí dvě specifikace rámců: CAN 2.0A a CAN 2.0B, které se liší v délce identifikátoru. Identifikátor základního formátu CAN 2.0A má délku 11bitů, identifikátor rozšířeného formátu CAN 2.0B má délku 29bitů.

Datový rámeček (DATA FRAME)

Datový rámeček zabezpečuje přenos informací z vysílajícího uzlu všem ostatním uzlům na sběrnici. Tento rámeček se skládá z následujících částí:

- *START OF FRAME* – úvodní jednobitové pole s dominantní hodnotou;
- *ARBITRATION FIELD* – arbitrážní pole sestávající se z identifikátoru a bitu RTR (Remote Transmission Request), který identifikuje, zdali se jedná o datový rámeček (DATA FRAME) nebo žádost o vysílání (REMOTE FRAME). Toto pole určuje prioritu vysílané zprávy. Uzel při vysílání neustále monitoruje stav na sběrnici. Zjistí-li uzel, že vysílá recesní bit a na sběrnici je bit dominantní, okamžitě přestává vysílat. Tímto způsobem je zabezpečeno, aby přístup ke sběrnici dostal ten, jehož zpráva má nejvyšší prioritu. Současně je zabezpečeno, aby při nárůstu zatížení sběrnice nedošlo ke snížení přenosového výkonu sítě.
- *CONTROL FIELD* – řídicí pole, které obsahuje bit IDE (Identifikátor Expresion) pro rozlišení základního a rozšířeného formátu, rezervní bit a 4 bity DLC (Data Length) určující počet byte datového pole (0 až 20 byte). Poměrně malá délka tohoto pole vychází z původního záměru CAN, tj. především zabezpečení rychlého přenosu zpráv s vysokou prioritou. Delší bloky dat je nutno segmentovat v aplikační úrovni. Všechna data na sběrnici jsou dostupná všem uzlům současně.
- *DATA FIELD* – datové pole o velikosti 0 až 8 bajtů
- *CRC FIELD* (Cyclic Redundancy Code) – nese 15 kontrolních bitů cyklického redundantního kódu při zahrnutí všech předcházejících polí. Pole je ohraničeno recesivním bitem ERC (END OF CRC)
- *ACKNOWLEDGE FIELD* – potvrzující pole, které sestává z bitů ACK SLOT a ACK DELIMITER. Vysílač vysílá bit ACK SLOT jako recesivní. Pokud alespoň jeden uzel přijal

zprávu bez chyby, přepíše tento bit na dominantní, čímž oznámí vysílači potvrzení příjmu. ACK DELIMITER je recesivní bit, takže ACK SLOT je ohraničen dvěma recesivními bity

- *END OF FRAME* – konec rámce se skládá z nejméně sedmi recesivních bitů, za nimiž následují nejméně 3 bity pro uklidnění všech vysílačů. V této době mohou přijímací uzly informovat vysílací uzel o chybách přenosu.
- *INTERMISSION FIELD + BUS IDLE* – mezilehlé pole + uklidnění sběrnice – 3 bity oddělující jednotlivé zprávy

Žádost o rámec (REMOTE FRAME)

Žádost o rámec má obdobný formát jako datový rámec. Neobsahuje však datové pole a bit RTR je recesivní (v datovém rámci je dominantní). Uzel takto žádá některý jiný uzel na síti o vysílání datového rámce se shodným identifikátorem, jaký je v žádosti.

Chybový rámec (ERROR FRAME)

Chybový rámec se skládá z polí ERROR FLAG a ERROR DELIMITER. Uzel, který zjistí chybu v řetězci přijímaných bitů, začne vysílat 6 dominantních bitů, čímž poruší strukturu rámce. Ostatní uzly začnou též vysílat 6 dominantních bitů. Celková délka ERROR FLAG tak může být 6 až 12 bitů. Za nimi následuje pole ERROR DELIMITER s 8 recesivními bity.

Rámec přeplnění (OVERLOAD FRAME)

Rámec přeplnění má obdobnou strukturu, jako chybový rámec. Uzel vyšle tento rámec především tehdy, když potřebuje určitý čas na zpracování předchozí zprávy.

[9]

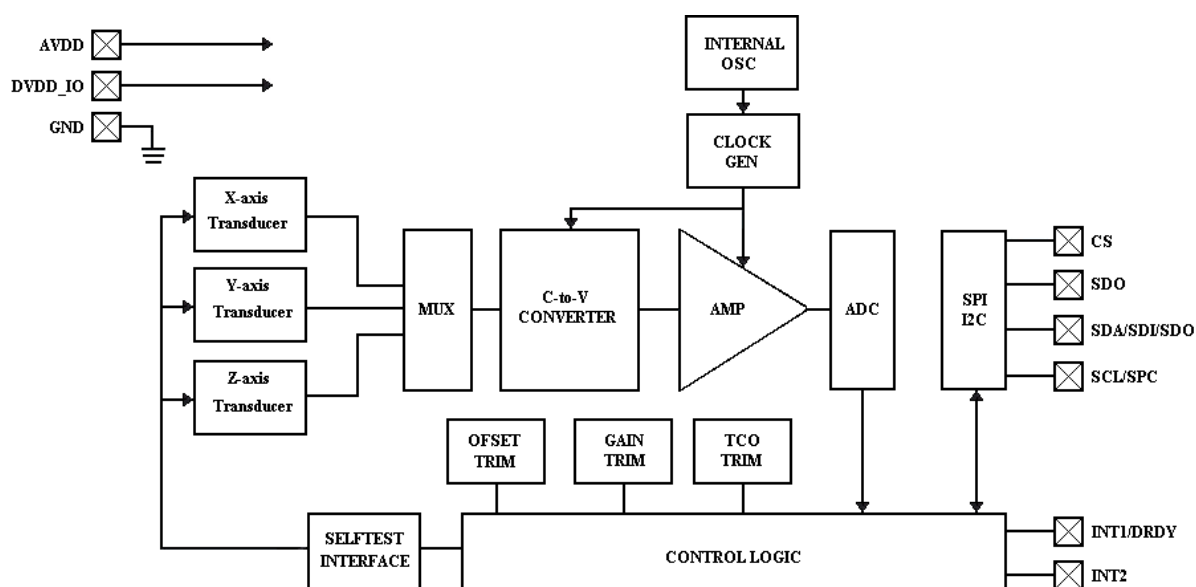
6 Zvolené senzory a ostatní integrované obvody

Senzory byly voleny podle cenově i fyzicky dostupných možností.

6.1 Akcelerometr MMA7455

Akcelerometr MMA7455L má digitální výstup pomocí sběrnice I2C a SPI. Je to nízkoprofilové kapacitní, mikromechanické elektronické čidlo zrychlení. Uvnitř senzoru jsou integrovány obvody na úpravu signálu jako dolnoproustný filtr, teplotní kompenzace, obvody pro self-test, obvody signalizující zrychlení 0g pomocí přerušení (INT1 nebo INT2) a detekci rychlého pohybu.

Kompenzace 0g a citlivost jsou továrně nastavena a nepožadují žádné externí zařízení. 0g může být kompenzováno uživatelem pomocí přiřazených 0g registrů a rozsahy měření můžeme změnit pomocí daných instrukcí. MMA7455L umožňuje také úsporný režim, určen především pro aplikace napájené z baterií.



Obr. 32 Blokové schéma akcelerometru MMA7455L

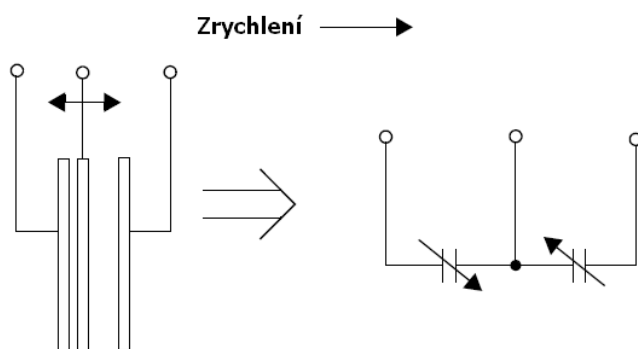
[24]

6.1.1 Princip funkce

Akcelerometr MMA7455L obsahuje povrchové mikromechanické a mikroelektronické části. Zařízení se skládá z povrchového mikromechanického kapacitního snímače a obvodů pro úpravu signálu obsažené v jediném pouzdře. Čidlo je hermeticky uzavřené, používá množství mikromechaniky. G- buňka je mechanická struktura vytvořená polovodičového křemíkového materiálu. Model této snímákové struktury můžeme vidět na obrázku (Obr. 33).

Snímákový prvek tvoří dvojice kondenzátorů s jednou společnou elektrodou. Společné elektrody snímákových kondenzátorů jsou spojeny s pohyblivým nosníkem, ten se při působení zrychlení vychyluje

ze své klidové polohy. Při vychýlení nosníku se posouvá i společná elektroda kondenzátorů a tím se ve stejném poměru mění jejich kapacita, ($C=A\varepsilon/D$). Kde A je plocha společné elektrody, ε je permitivita a D je vzdálenost mez elektrodami. ASIC využívá komutované kondenzátorové techniky k tomu, aby měřila zrychlení z rozdílů kapacit těchto kondenzátorů.

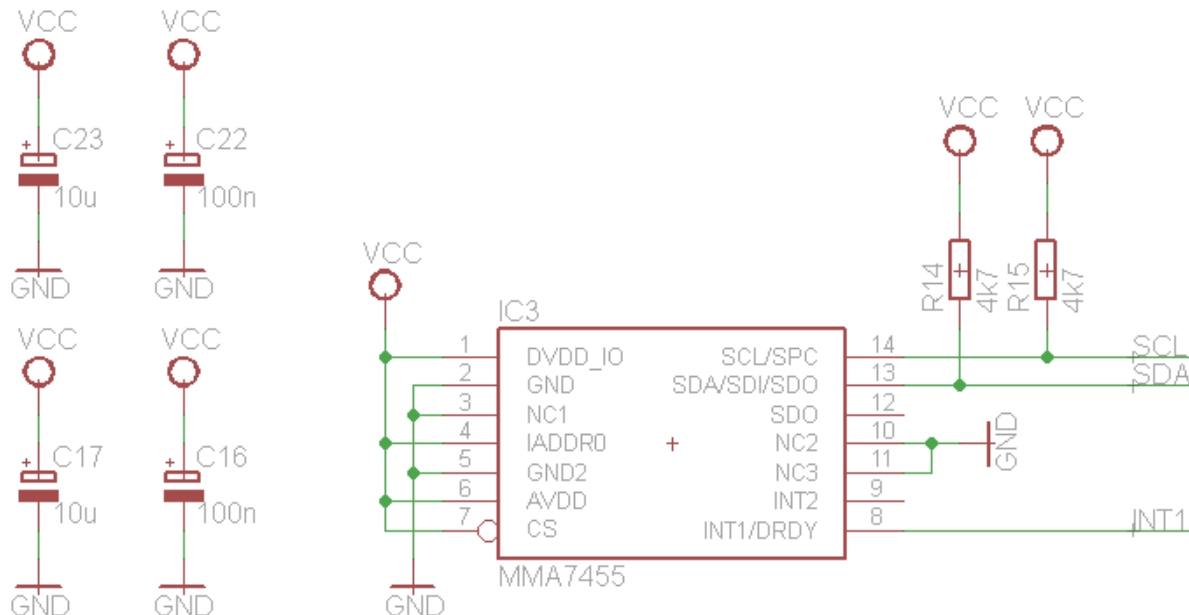


Obr. 33 Model kapacitního snímače zrychlení

[24]

6.1.2 Schéma zapojení akcelerometru

Jelikož se jedná o akcelerometr s digitálním výstupem, je propojen s procesorem jen dvěma vodiči (sběrnice I²C).



Obr. 34 Schéma zapojení akcelerometru MMA7455L

6.2 Gyroskopy LY530 a LPR530

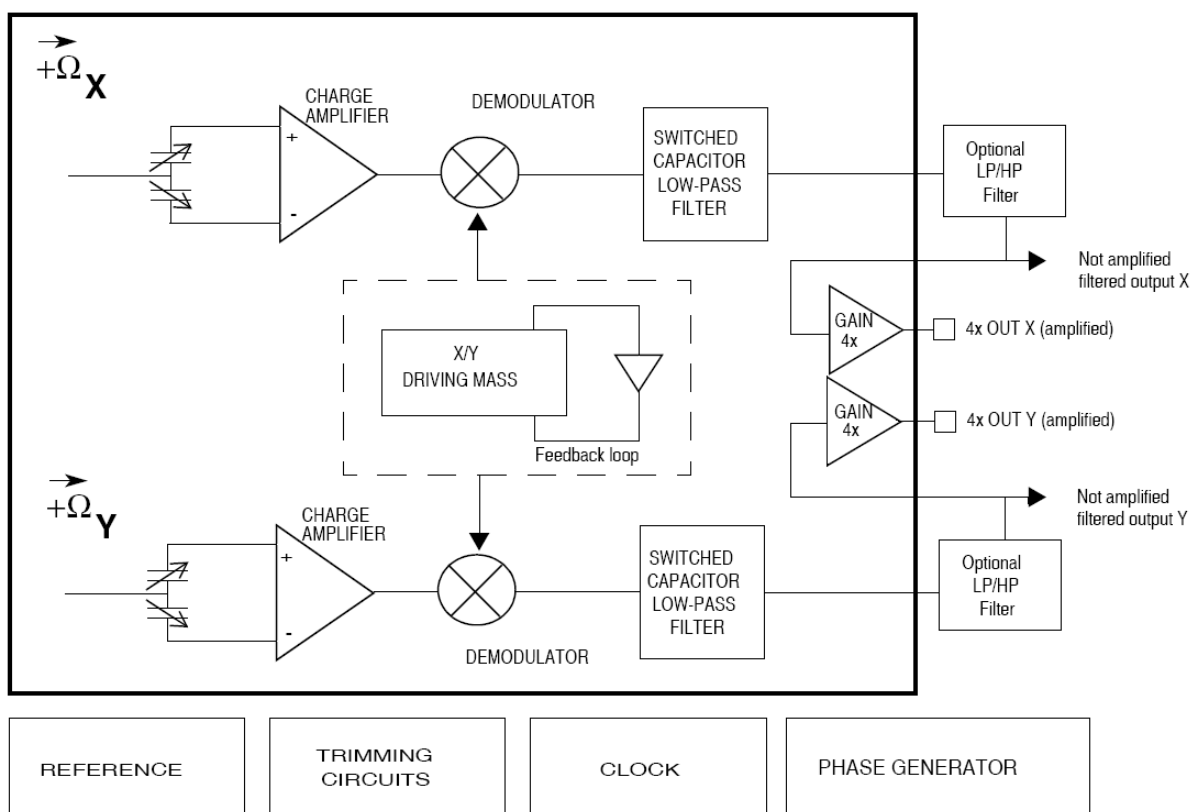
LPR530AL, LY530ALH mají rozsah ± 300 °/s, a je schopné měřit s šířkou pásma do 140 Hz. Gyroskop je kombinací jednoho aktuátoru a jednoho akcelerometru integrovaných do jediné mikromechanické struktury. Ta zahrnuje snímací prvek složený z jediné hnací hmoty, udržované v kontinuálním oscilačním pohybu, která reaguje na úhlovou rychlost na základě rotačního principu.

CMOS IC poskytuje měřenou úhlovou rychlost prostřednictvím analogového výstupu napětí, což umožňuje vysokou úroveň integrace a výrobní zmenšování k tomu, aby lépe odpovídaly charakteristiky senzoru.

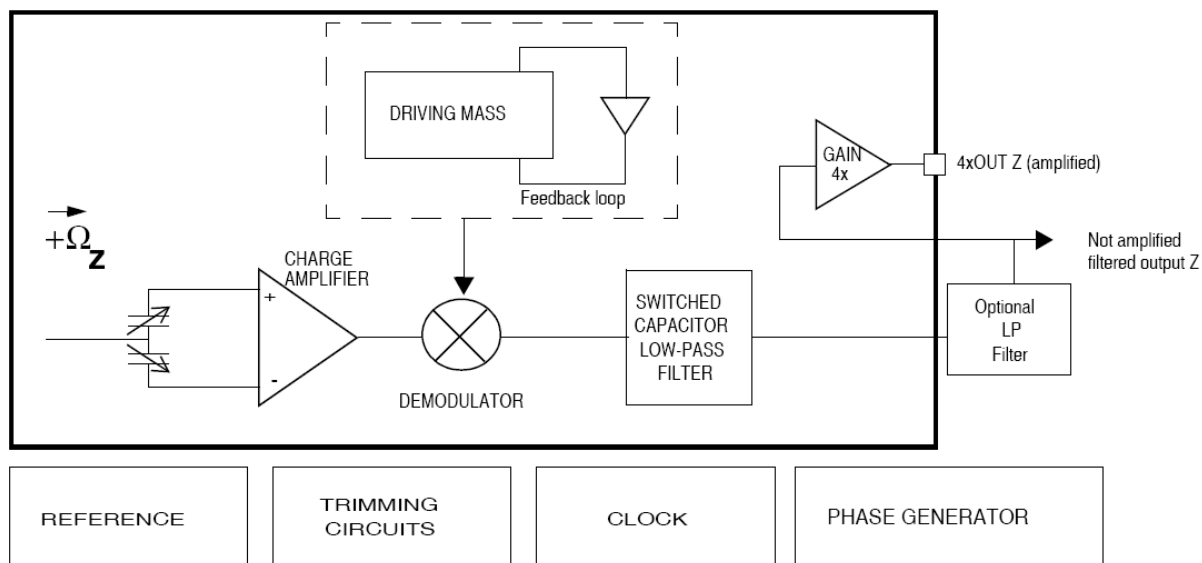
Na rodinu gyroskopů ST má vliv velký a vyspělý výrobní proces již užívaný v produkci mikromechanických gyroskopů. LPR530AL, LY530ALH jsou dodávány v plastovém pouzdře LGA, které bylo již několik let úspěšně používáno pro akcelerometry.

LY530ALH je nízkopříkonový jednoosý mikromechanický gyroskop schopný měřit úhlovou rychlost podél osy Z. LPR530AL je nízkopříkonový dvouosý mikromechanický gyroskop schopný měřit úhlovou rychlost podél os X, Y. Ten poskytuje vynikající teplotní stabilitu a vysoké rozlišení s širokým operačním rozsahem teplot (-40 °C + 85 °C).

Používá se v navigačních a herních zařízeních, pro řízení pohybu s uživatelským rozhraním, v průmyslu a robotice.



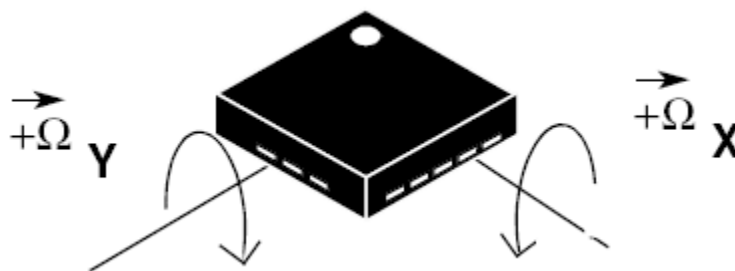
Obr. 35 Blokové schéma gyroskopu LPR530AL



Obr. 36 Blokové schéma gyroskopu LY530ALH

Pohybující se hmota. Vnitřní struktura gyroskopu je složena z nábojového zesilovače, ze kterého je signál přiveden společně se signálem ze sensorické části do demodulátoru. Poté je výstupní signál vyfiltrován. Pro větší rozsah ($1200^\circ/\text{s}$) měření úhlové rychlosti je použit výstup bez dalšího zesílení. Z vnějšku je nutné poté ještě připojit dolnoproustný RC filtr. Při měření na nižším rozsahu ($300^\circ/\text{s}$) je nutno nezesílený filtrovaný signál přivést zpět do gyroskopu, který obsahuje čtyřnásobný zesilovač. Výstupní signál se bere oproti referenci gyroskopu.

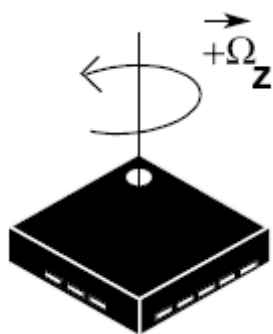
Možné výstupní hodnoty signálu:



Obr. 37 Citlivé osy gyroskopu LPR530AL

Ustálený stav (LPR530AL):
 $4xOUTX = 4xOUTY = 1.23V$
 $OUTX = OUTY = 1.23V$

Pozitivní směr rotace (LPR530AL):
 $+300^\circ/\text{sec} \rightarrow 4xOUTX, 4xOUTY = 1.23V + SoA \cdot 300 = 2.23V$
 $+300^\circ/\text{sec} \rightarrow OUTX, OUTY = 1.23V + So \cdot 300 = 1.48V$



Obr. 38 Citlivá osa gyroskopu LY530ALH

Pozice v ustáleném stavu (LY530ALH):

$$4 \times \text{OUTZ} = 1.23\text{V}$$

$$\text{OUTZ} = 1.23\text{V}$$

Pozitivní směr rotace (LY530ALH):

$$+300^\circ/\text{sec} \rightarrow 4 \times \text{OUTZ} = 1.23\text{V} + \text{SoA} \times 300 = 2.23\text{V}$$

$$+300^\circ/\text{sec} \rightarrow \text{OUTZ} = 1.23\text{V} + \text{So} \times 300 = 1.48\text{V}$$

kde SoA, So jsou citlivosti pro dané rozsahy.

Gyroskop produkuje pozitivní výstupní úroveň napětí, při rotaci proti směru hodinových ručiček kolem osy Z. Citlivost popisuje zisk sensor k definované úhlové rychlosti. Tato hodnota se mění jen velmi málo s teplotou a časem.

Zero-rate level popisuje skutečný výstupní signál, jestliže na senzor nepůsobí žádná úhlová rychlost. Zero-rate level přesných senzorů MEMS je do jisté míry důsledkem neustálenosti senzoru a ten se může lehce změnit po montáži senzoru na tištěné desce nebo po vystavení to rozsáhlému mechanickému namáhání. Tato hodnota se mění velmi málo s teplotou a časem.

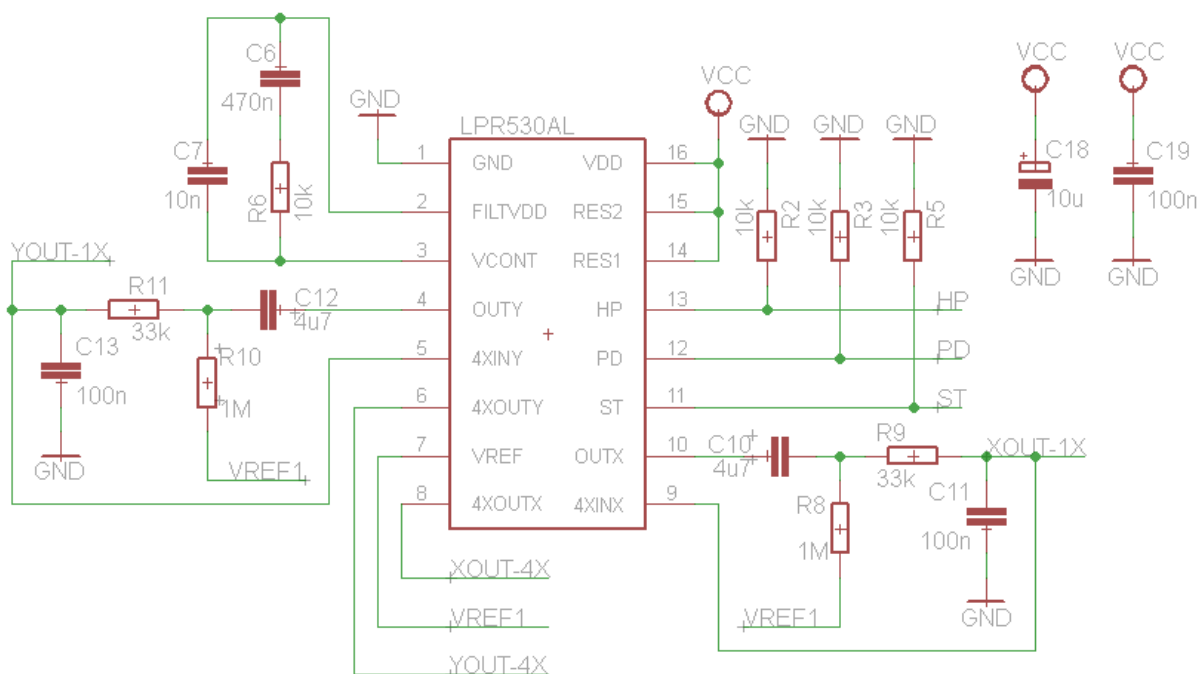
Self-test dovoluje testování mechanické a elektrické části senzoru, dovolující přesunutí seizmické masy elektrostatickou zkušební silou. Funkce testu je vypnutá, když je na pinu ST log. 0. Když je pin ST v úrovni log. 1, je zkušební síla aplikovaná na senzor, napodobující konečnou Coriolisovu sílu. V tomto případě výstup senzoru ukáže změnu ve voltáži jeho DC úrovně, která je také závislá na napájecím napětí. Když je ST v úrovni log. 1, zařízení výstupní úroveň dostává algebraickým součtem signálů produkovaných úhlovou rychlostí na senzoru a elektrostatickou zkušební silou.

LY530ALH dává možnost resetovat volitelnou externí horní propust přivedením log. 1 na pin HP. Tato procedura zajišťuje rychlejší odezvu, zvláště během situací přetížení. Navíc, tato operace je navrhovaná vždy, když je zařízení napájeno.

[25], [26]

6.2.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení obou gyroskopů je shodné, rozdíl je jen v tom, že gyroskop LPR530AL má dva výstupy a LY530ALH jen jeden.



Obr. 39 Schéma zapojení gyroskopu LPR530AL

LPR530AL je elektronický 2osý MEMS gyroskop s analogovými výstupy měřené veličiny (OUTX, OUTY, 4xOUTX, 4xOUTY) a referenční napětí (VREF) udávající nulovou úhlovou rychlost gyroskopu. Obsahuje také tři řídicí linky HP, PD, ST.

LPR530AL obsahuje dva nezesílené výstupy pro jeho dvě citlivé osy pro rozsah $1200^{\circ}/s$. Napětí na těchto výstupech odpovídá úhlové rychlosti v poměru $0.83 \text{ mV}/^{\circ}/s$. Za těmito výstupy je použit filtr typu dolní propust pro filtraci výstupního napětí od vysokofrekvenčních složek s mezní frekvencí 140Hz . Tyto výstupní napětí mohou být přivedeny zpět to gyroskopu na vstupy 4xINX a 4xINY pro využití měření v jiném rozsahu.

Dalšími výstupy jsou 4xOUTX a 4xOUTY, které jsou oproti výstupům OUTX a OUTY 4x zesíleny a tudíž můžeme měřit v rozsahu úhlové rychlosti jen $300^{\circ}/s$. Pro mou aplikaci to postačuje, jelikož při použití v automobilu se tato úhlová rychlost nepřekročí, jediné v případě dostane-li se automobil do nestandardní situace (smyk, přetočení nebo převrácení).

Gyroskopy také obsahují tři řídicí vstupy. Linka HP poskytuje možnost resetovat volitelnou externí horní propust přivedením logické hodnoty 1. Tato procedura zajišťuje rychlejší odezvu, zvláště během podmínek přetížení. Navíc, tato operace je doporučena vždy, když je zařízení napájeno. Vstupem ST se spouští self-test, který dovoluje testování mechanické a elektrické části senzoru, spočívá v přesunutí seismické hmoty elektrostatickou zkušební silou. Funkce self-test je vypnutá, když pin ST je v úrovni log. 0. Když je na pin ST přivedena úroveň log. 1, použitá síla je aplikovaná na

senzor, napodobující konečnou Coriolisovu sílu. V tomto případě senzorický výstup ukáže změnu ve výstupním napětí, které je také závislé na napájecím napětí. Když je na ST úroveň log. 1, zařízení dostává výstupní úroveň algebraickým součtem signálů produkovaných působením úhlové rychlosti na senzor a elektrostatickou zkušební silou. Jestli se výstupní signály mění v rozmezí udávaných hodnot, pak mechanický element pracuje řádně a parametry čipu jsou v mezích definovaných specifikací.

Všechny tyto vstupy a výstupy jsou propojeny s mikroprocesorem ATmega16. Výstupy jsou přivedeny na 10b A/D převodníky integrované přímo v procesoru.

[25], [26]

6.3 Digitální magnetický kompas HMC5843

Honeywell HMC5843 je digitální magnetický kompas určený pro povrchovou montáž. Multi-modulový čip určený pro snímání nízkého magnetického pole s číslicovým rozhraním pro cenově nenáročné aplikace a magnetometry. HMC5843 obsahuje magneto-odporové senzory, nastavitelný offset, 12-bitové ADC a I²C sériové sběrnice rozhraní. HMC5843 je v pouzdře o rozměrech 4 x 4 x 1.3 mm určeném pro povrchovou montáž (LCC). Aplikace s HMC5843 se objevují ve spotřební elektronice, automobilových navigačních systémech, v osobních zařízeních navigace, a magnetometrech.

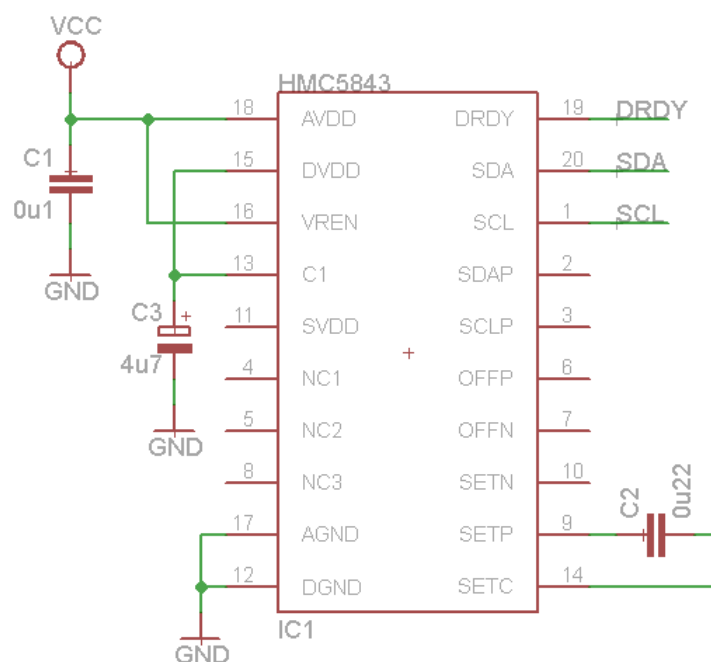
HMC5843 využívá Honeywell anizotropní magneto-resistivní (AMR) technologii, která poskytuje výhody nad dalšími magnetickými senzorovými technologiemi. Rysy senzoru jsou preciznost, citlivost v osách a linearita, konstrukce s velmi nízkou citlivostí v bočních osách navrženými k tomu, aby měřily oba směry a velikosti zemských magnetických polí, od desítek mikrogaussů až 6 gaussů. Honeywell magnetické senzory se řadí mezi nejcitlivější a nejspolehlivější senzory pro měření nízkého magnetického pole v průmyslu.

Honeywell HMC5843 magneto-resistivní senzorický obvod se skládá z trojice senzorů a podpůrných obvodů určených k tomu, aby měřily magnetické pole. S aplikovaným napájením, senzor přeměňuje vyskytující se magnetické pole v citlivých směrech os na rozdílové napětí na výstupu. Magneto-resistivní senzory jsou zhotovené z tenké nikl-železné (permalloy) vrstvy. V přítomnosti magnetického pole, změna v můstku odporových elementů způsobuje odpovídající změnu napětí v můstku. Tyto odporové články citlivé v dané ose budou poskytovat kladné napětí měnící se zvýšením magnetického pole v citlivém směru. Protože výstup je jen v poměru k jednorozměrné ose (princip anizotropie) a jeho velikosti, jsou zde umístěny dodatečné senzorové můstky sestávající se z kolmých úhlů, dovolí přesné měření libovolného směru magnetického pole.

[27]

6.3.1 Schéma zapojení testovací desky s HMC5843

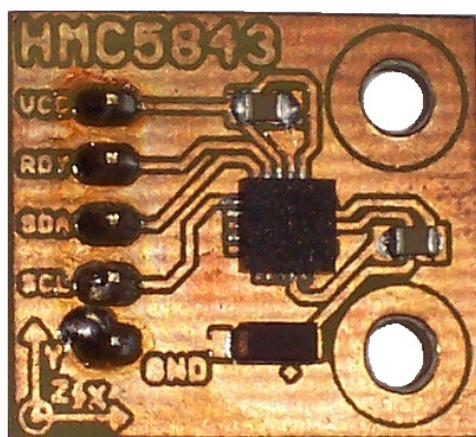
Integrovanému obvodu digitálního kompasu ke své činnosti stačí pouze tři kondenzátory. Pull-up rezistory se v zapojení nenacházejí, protože budeme-li chtít na sběrnici připojit více zařízení, které by měly zapojeny pull-up rezistory budou se jejich hodnoty paralelně kombinovat. Toto by vedlo k snížení celkové hodnoty pull-up rezistoru a tekl by sběrnici vysoký proud.



Obr. 40 Schéma zapojení HMC5843

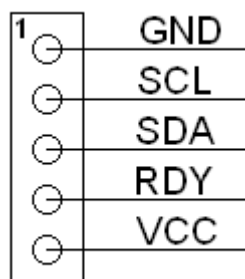
6.3.2 Testovací deska s HMC5843

HMC5843 je použit jako pomocný senzor pro korekci orientace natočení systému. Pro digitální kompas byla vytvořena jen zkušební deska bez procesorové jednotky. Obvod je osazen na jednostranném plošném spoji s potřebnými pasivními prvky. Propojení s procesorem je realizováno 5pinovým konektorem, který obsahuje napájení (3V), komunikační sběrnici I²C a přerušení RDY signalizující aktualizaci dat kompasu.



Obr. 41 Modul digitálního kompasu

Na dalším obrázku jsou popsány piny konektoru, kde na jeho koncích je napájení 3V. Piny SCL a SDA jsou hodinovou a datovou linkou sběrnice I²C. RDY je přerušovací pin od kompasu aktivní v úrovni log. 0.



Obr. 42 Popis konektoru modulu kompasu

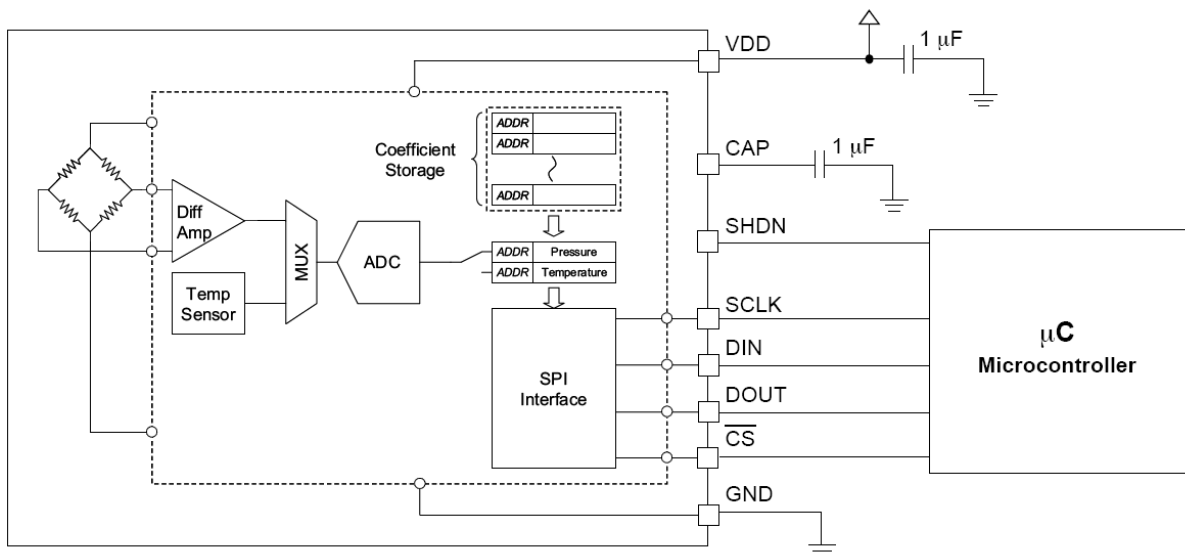
6.4 Tlakové čidlo MPL115A

Pomocný senzor pro orientační měření rychlosti oproti prostředí.

MPL115A je jednoduchý tlakový senzor s digitálním výstupem pro nízkonákladové aplikace. Používá se snímač tlaku MEMS, aby poskytoval přesné údaje. Integrovaný A/D převodník obsahuje digitální teplotní a tlakové čidlo s výstupem přes sběrnici SPI (MPL115A1) nebo I2C (MPL115A2). Kalibrační údaje jsou umístěny v paměti ROM. Tato data jsou užívána hostitelským mikroprocesorem k tomu, aby použil algoritmy kompenzace syrových dat snímače, a můžou být zpřístupněny kdykoliv. Kalibrační data jsou typicky zpřístupněny, když hostitelský mikroprocesor poprvé aktivuje senzor. MPL115A1 komunikuje jako slave po sběrnici SPI s rychlostí až 8 Mb / s. MPL115A2 komunikuje jako slave po sběrnici I²C s rychlostí až 400 kbit / sec (Fast Mode). Má nízkou spotřebu proudu 5 uA během činného módu a 1 uA během spánkového (Shutdown) modu. Je určen pro nízkopříkonové aplikace. Obě verze jsou nabízeny v 5.0 mm x 3.0 mm x 1.2 mm max. pouzdře LGA a jsou určeny pro provoz od -40 °C až 105 °C. Všechny pouzdra vyhovují směrnici RoHS.

Parametry senzoru:

- digitální informace o tlaku a teplotě společně s naprogramovanými kalibračními koeficienty;
- továrně kalibrováno;
- rozsah tlaku 50 kPa až 115 kPa;
- přesnost 1 kPa;
- napájecí napětí 2.375 V až 5.5 V;
- integrovaný 10b A/D převodník;
- SPI rozhraní;
- dostupný v provedení pro povrchovou montáž.



Obr. 43 Schéma zapojení nekompenzovaného tlakového senzoru

[28]

6.4.1 Kompenzace

Výstupní 10- bitový kompenzovaný tlak P_{comp} , je vypočítaný tímto způsobem:

$$P_{comp} = a_0 + (b_1 + c_{11} \cdot P_{adc} + c_{12} \cdot T_{adc}) \cdot P_{adc} + (b_2 + c_{22} \cdot T_{adc}) \cdot T_{adc} \quad (5)$$

kde P_{adc} ... 10- bitová výstupní hodnota MPL115A1 tlaku,
 T_{adc} ... 10- bitová výstupní hodnota MPL115A1 teploty,
 a_0 ... offsetový koeficient tlaku,
 b_1 ... citlivostní koeficient tlaku,
 c_{11} ... koeficient tlakové linearity,
 c_{12} ... koeficient teplotní citlivosti (TCS),
 b_2 ... první pořadí teplotní offsetový koeficient (TCO),
 c_{22} ... druhý objednací teplotní offsetový koeficient.

V ideálním případě, P_{comp} bude nabývat hodnoty 0 při vstupním tlaku 50 kPa a maximální hodnoty 1023 při vstupním tlaku 115 kPa.

[28]

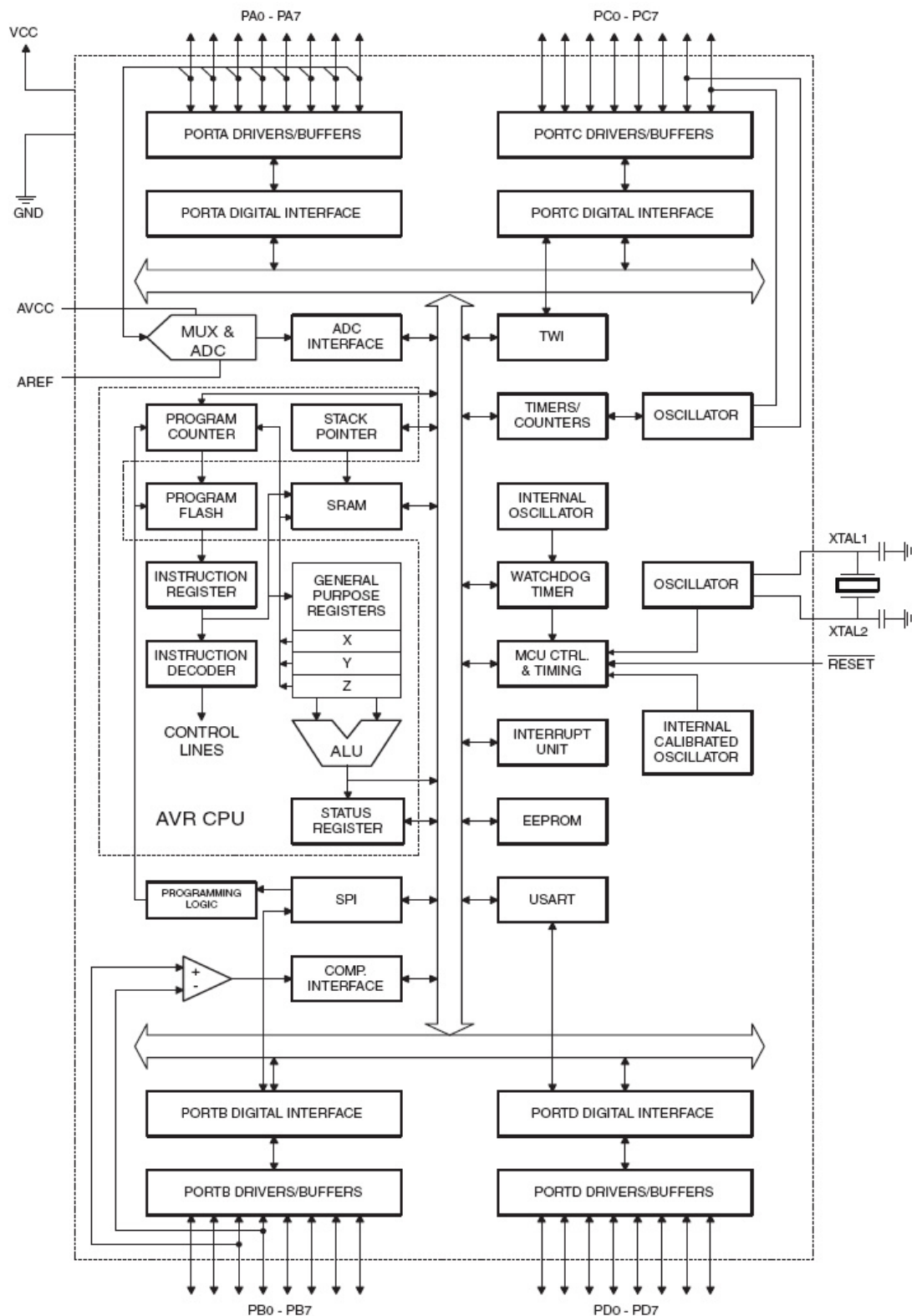
6.5 Mikroprocesor ATmega16

Jádro AVR v sobě spojuje bohatou instrukční sadu s 32 univerzálními pracovními registry. Všechny 32 registrů je přímo napojeno na aritmetickou logickou jednotku (ALU), dovolující zpřístupnění dvou registrů v jediné instrukci provedené v jednom hodinovém cyklu.

ATmega16 poskytuje následující funkce: 16K bytů In-System programovatelné Flash paměti, programová paměť se schopností z paměti číst, když je do ní zapisováno, 512 bytů EEPROM, 1K byte SRAM, 32 univerzálních I/O linek, 32 univerzálních pracovních registrů, rozhraní JTAG pro Boundaryscan, podpora „On-chip“ ladění a programování, tři flexibilní časovače/čítače s porovnávacími režimy, vnitřní a vnější přerušení, sériový programovatelný USART, dvouvodičové sběrnice rozhraní, 8-kanálový 10-bit ADC, programovatelný Watchdog Timer s interním oscilátorem, sériový port SPI a šest softwarově volitelných úsporných režimů.

Režim Idle zastaví CPU a současně umožní USART, dvouvodičové sériové rozhraní, A/D převodník, SRAM, časovače/čítače, SPI port a přerušovací systém. Power-down režim uloží obsahy registrů, ale zamrzne oscilátor, vypnou se všechny ostatní funkce čipu, až do příštího vnější přerušení nebo hardwarového resetu. V Power-save režimu je asynchronní Timer i nadále provozován, umožňuje uživateli udržet časovou základnu, zatímco zbytek přístroje spí.

[23]



Obr. 44 Blokové schéma procesoru ATmega16

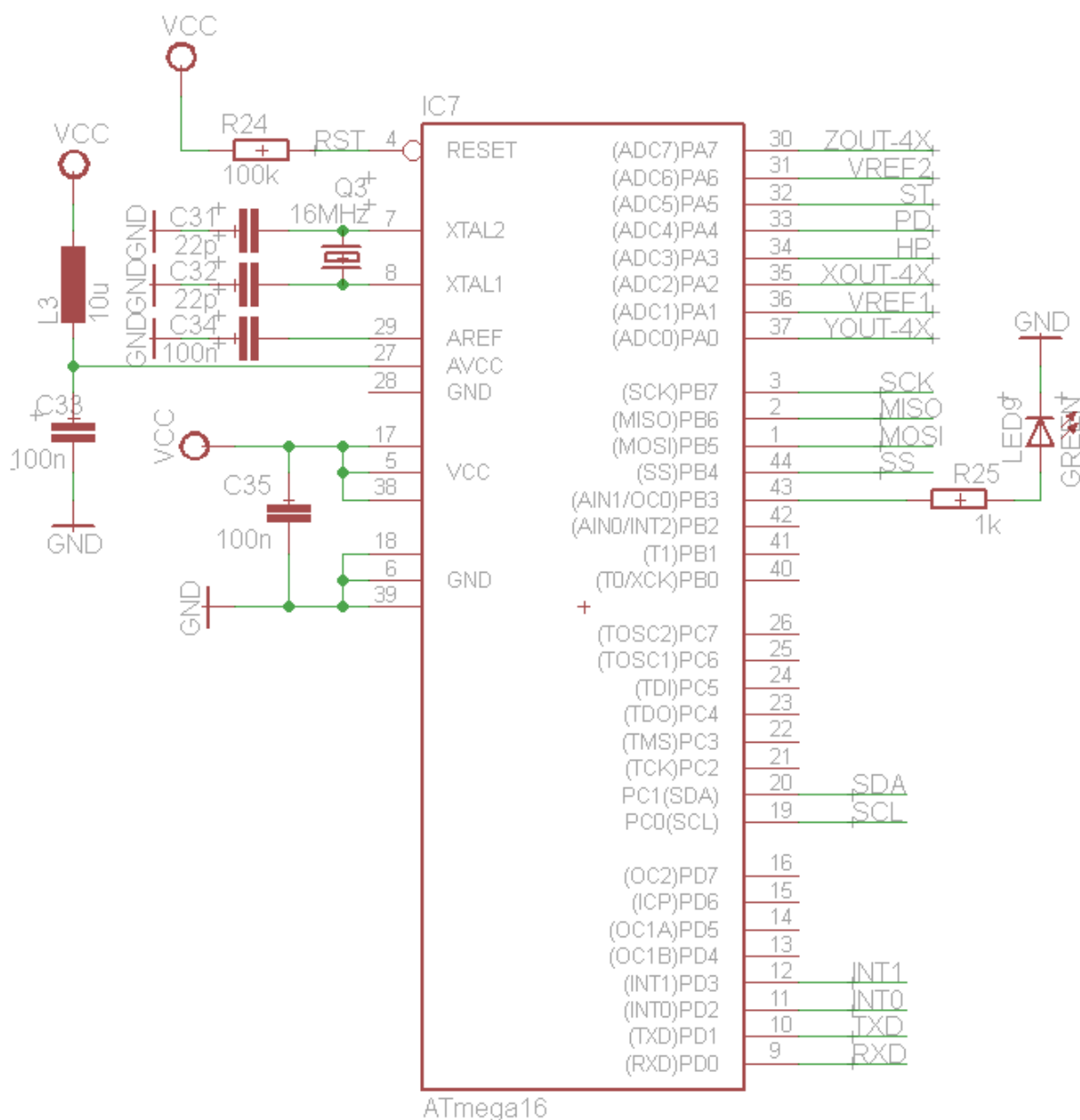
[23]

6.5.1 Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega16

Pro řízení modulu byl použit mikroprocesor ATmega16. Je taktován 16MHz krystalem. U procesoru jsou využity všechny jeho sériové linky. Sběrnice SPI (linky MOSI, MISO, SCK, RST, SS) pro připojení programátoru a převodníku SPI/CAN. Dále sběrnice I²C (linky SDA, SCL), kterou používá pro komunikaci s akcelerometrem. A jako poslední je rozhraní UART (linky TxD, RxD) pro připojení k počítači a přenosu dat.

Bylo využito také obou vnějších hardwarových přerušení. INT0 jako přerušení od sběrnice CAN a INT1 přerušení od akcelerometru MMA7455 při načtení nové hodnoty.

Tlumivka L3 a keramický kondenzátor C33 jsou doporučeny výrobcem při používání interních A/D převodníků.



Obr. 45 Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega16

6.6 CAN převodník

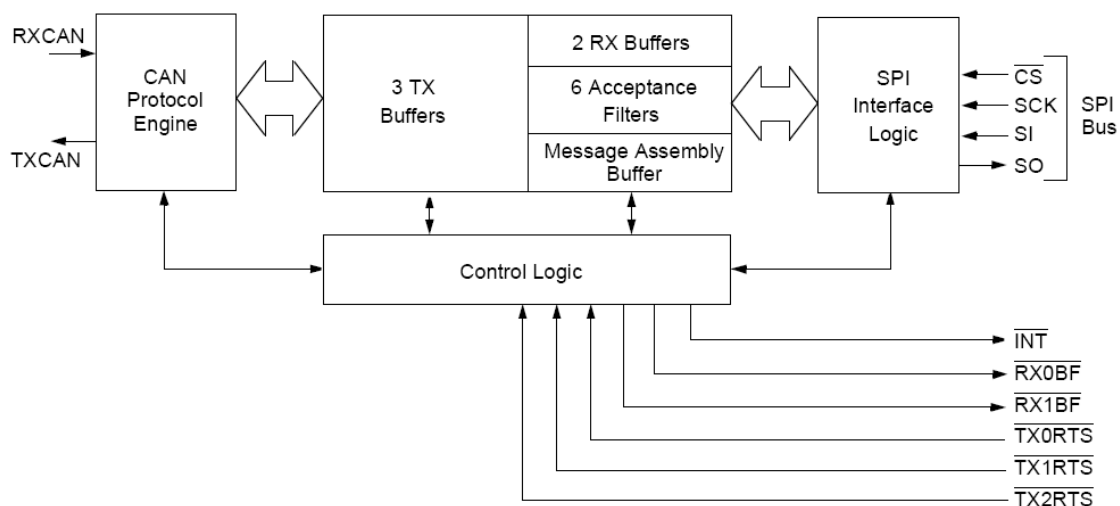
Pro realizaci řídicí jednotky nebo jiného systému se sběrnici CAN je zapotřebí několik obvodů:

- mikroprocesor obsluhující události, dávající pokyn pro vysílání zpráv a zpracovávající přijatá data;
- řadič CAN (CAN controller) realizující datovou linkovou vrstvu protokolu CAN (rámce, chybové zabezpečení, arbitráž, filtrování zpráv atd.);
- budič CAN (CAN transceiver) realizující fyzickou vrstvu protokolu CAN, tj. převod signálu z řadiče CAN (TTL úroveň) do fyzické vrstvy CAN - napětí, diferenciální sběrnice.

Integrovaný obvod firmy Microchip Technology MCP2510 je kontrolér protokolu Controller Area Network (CAN) realizující CAN specifikace V2.0 A/B. Také podporuje CAN 1.2, CAN 2.0A, CAN 2.0B pasívní, a CAN 2.0B Aktivní verze protokolu je schopná standardních vysílacích, přijímajících a rozšířených zpráv. Je také schopen filtrování přijatých zpráv a řízení zpráv. Obsahuje tři vysílací a dva přijímací buffery, které redukují využití mikrořadiče pro komunikaci po sběrnici CAN. Komunikace s procesorem je implementovaná přes průmyslovou standardní Serial Peripheral Interface (SPI) s rychlostí přenosu dat až do 5 Mb/s.

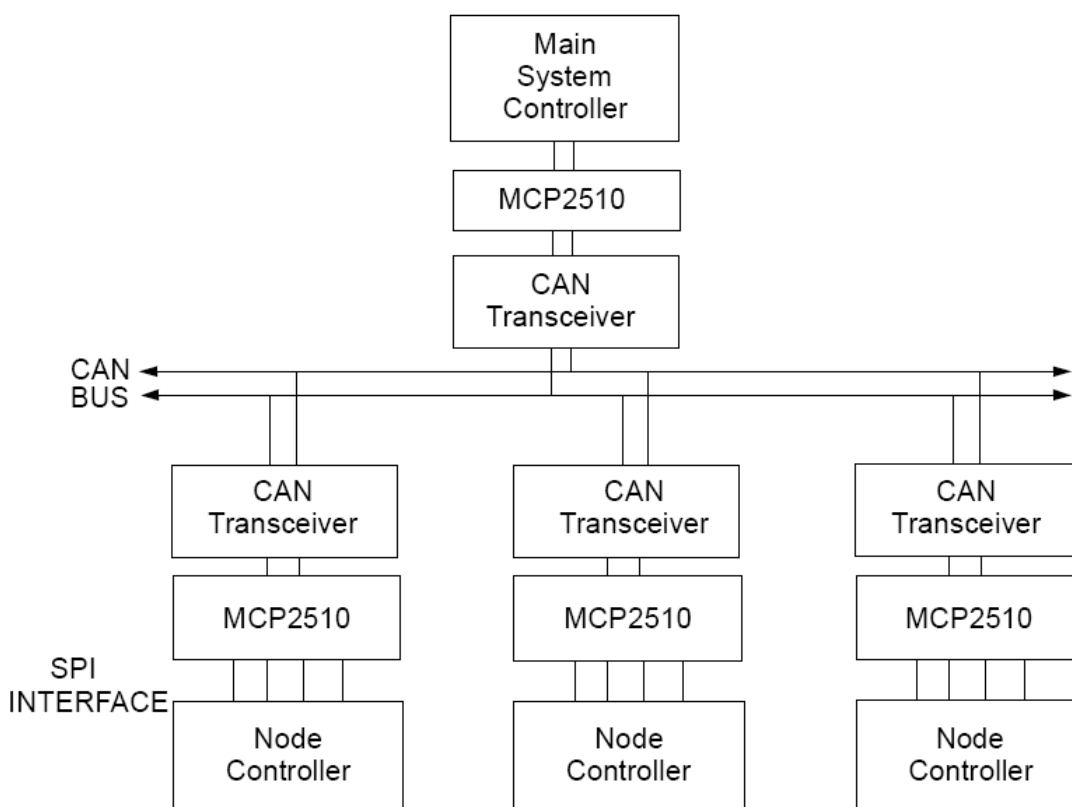
MCP2510 je samostatný CAN kontrolér vyvinutý k tomu, aby zjednodušil aplikace, které požadují propojení s datovými sběrnici CAN. Jednoduché blokové schéma MCP2510 je ukázáno na Obr. 46. Zařízení se skládá ze tří hlavních bloků:

- CAN protokol engine;
- kontrolní logika a SRAM registry, které jsou používány pro konfiguraci zařízení a jeho činnost;
- SPI protokol blok.



Obr. 46 Blokové schéma CAN kontroléru

Typická realizace použití systému zařízení je ukázána na Obr. X. CAN protokol engine zachytává všechny přijímané a vysílané zprávy na sběrnici CAN. Zprávy jsou přeneseny do příslušného bufferu zpráv a kontrolních registrů. Přenos je zahájen nastavením bitů kontrolního registru přes rozhraní SPI, nebo nastavením pinů pro přenášení. Stav a chyby mohou být kontrolovány čtením vhodných registrů. Každá zpráva detekovaná na sběrnici CAN je kontrolována na přítomnost chyb. Poté se proženou uživatelsky definovanými filtry, kde uvidí, zda má zpráva být přesunuta do jednoho ze dvou přijímacích bufferů.

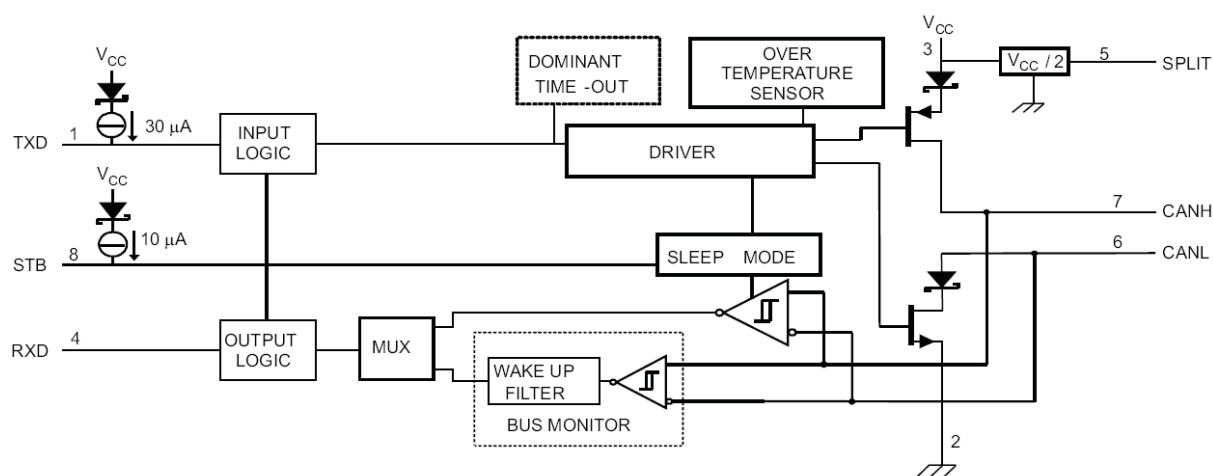


Obr. 47 Bloková realizace systému

MCU rozhraní pro komunikaci se zařízením je použito SPI. Zápis a čtení ze všech registrů se provádí používáním standardních SPI příkazů čtení a zápisu. Přerušovací piny jsou využity k větší systémové flexibilitě. Zde je jeden univerzální přerušovací pin stejně jako specifické přerušovací piny pro každý z přijímacích registrů, které mohou být použity k signalizaci přijetí platné zprávy a zavedení do jednoho z přijímacích bufferů. Použití specifických přerušovacích pin je volitelné, a hlavní účel přerušovacích pinů stejně jako status registru (zpřístupněný přes SPI rozhraní) je užití pro rozhodování, kdy je přijata platná zpráva. K dispozici jsou také tři piny pro zahájení okamžitého přenos zprávy, která byla vložena do jednoho ze tří odesílacích registrů. Použití těchto pinů je volitelné a inicializují přenos zpráv. To může být také realizováno využitím kontrolního registru přístupného přes SPI rozhraní.

Jako budič sběrnice CAN jsem použít obvod firmy Texas Instruments SN65HVD1040. Toto zařízení je schopno přijímat a vysílat data z CAN kontroléru o rychlosti až do 1 megabit za sekundu (Mbps). Určený pro činnost v zvláště těžkých prostředích.

Vstupem STB (pin 8) se vybírá mezi dvěma různými režimy: vysokorychlostní nebo nízkovýkonový mód. Vysokorychlostní provozní režim je vybrán přivedením log. 0 na vstup STB. Jestliže je přivedená úroveň log. 1 na pin STB, zařízení vstupuje do nízkovýkonového režimu (monitorovací úsporný režim). Zatímco SN65HVD1040 je v nízkovýkonovém monitorovacím úsporném režimu, dominantní bit projde maximálně každých 5 μ s obvodem monitorujícím sběrnici k výstupu přijímače. Lokální protokol kontrolér pak může znovu aktivovat zařízení, když potřebuje přenášet na sběrnici.



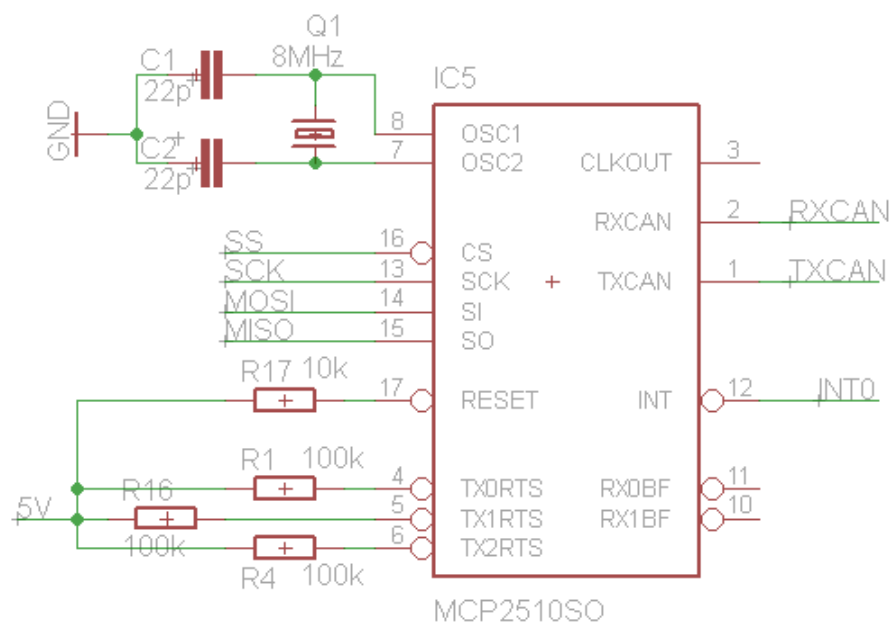
Obr. 48 Vnitřní schéma budiče SN65HVD1040

Dominantní time-out obvod v SN65HVD1040 zabráňuje kontroléru blokování síťové komunikace během hardwarového nebo softwarového selhání. Time-out obvod se spustí sestupnou hranou na pinu TXD (pin 1). Jestliže není detekována žádná vzestupná hrana do vypršení time-out, řadič je deaktivovaný. Obvod je pak resetován příští vzestupnou hranou na TXD.

[21], [22]

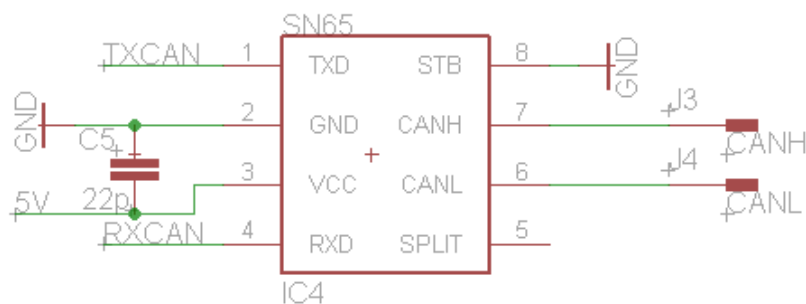
6.6.1 Schéma zapojení kontroléru a budiče sběrnice CAN

Data přenášená mezi procesorovou jednotku a řadičem CAN jsou přenášena po sběrnici SPI (linky MOSI, MISO, SCK, SS). Řadič je taktován 8 MHz krystalem připojeným k pinům OSC1 a OSC2. Je napájen pětivozovou větví zdroje. Univerzální přerušení INT0 je přivedeno k procesoru pro řízení komunikace po sběrnici. Specifické přerušovací piny (RX0BF, RX1BF) nejsou použity. Komunikace mezi CAN kontrolérem a CAN budičem probíhá pomocí dvou linek RXCAN a TXCAN.



Obr. 49 Schéma zapojení řadiče sběrnice CAN

Budič CAN sběrnice je také napájen z pětivozové části zdroje. Pomocí pinů RXCAN A TXCAN komunikuje s CAN řadičem. Vstupem STB můžeme nastavit buď vysokorychlostní režim (log. 0) nebo nízkovýkonový režim (log. 1). V mém případě byl zvolen vysokorychlostní režim, jelikož zde nebyl kladen důraz na spotřebu systému. Pro připojení na sběrnici CAN slouží piny CANH a CANL.



Obr. 50 Schéma zapojení budiče sběrnice CAN

7 Praktický návrh inerciálního systému

Mým úkolem bylo vytvořit inerciální systém, který bude měřit orientaci objektu ve statických a dynamických podmínkách. Je to systém, jenž ke svému provozu nepotřebuje žádné vnější signály.

Pro korekci nebo doplnění inerciálního systému je možno použít neinerciálních senzorů jako například tlakový senzor nebo magnetický kompas. Tlakové senzory slouží k orientačnímu měření poměrné rychlosti automobilu oproti danému prostředí. Magnetický kompas můžeme použít pro zlepšení funkce gyroskopů, při měření natočení systému.

Tento modul by měl být použit do automobilu jako systém pro diagnostiku pohybu vozidla. Modul inerciálního systému musí být pevně spojen s kostrou automobilu, aby nedocházelo k nechtěným náhodným pohybům, otřesům či natočením. Může být například připevněn v motorové části vozidla, jelikož rušivé signály na tento systém nemají takový vliv.

Modul magnetického kompasu musí být také pevně spojen s automobilem, ale může být umístěn například na střeše automobilu. Ta sice není pevná (může se prohýbat nahoru a dolů), ale přesnost kompasu to neovlivní, jelikož jde jen o přímočarý pohyb a nikoliv o natočení. Ovšem nemůže být umístěn v motorové části automobilu jako inerciální senzory, jelikož je zde velká pravděpodobnost rušení elektromagnetickým polem, které by narušilo či znemožnilo funkci kompasu.

Jako první bylo vytvořeno blokové schéma systému podle dostupných senzorů a dalších integrovaných obvodů (viz. Obr. 51). Schéma je složeno ze tří částí: hlavního inerciálního systému, modulu magnetického kompasu a modulu s tlakovými senzory pro orientační měření rychlosti.

V dalším kroku byl navržen a sestrojen modul inerciální části, která snímá zrychlení a natočení systému. Modul byl propojen přes sériovou linku k počítači, kde se zobrazovala snímaná zrychlení a natočení. Zde byla zjištěna nedostatečná přesnost akcelerometru.

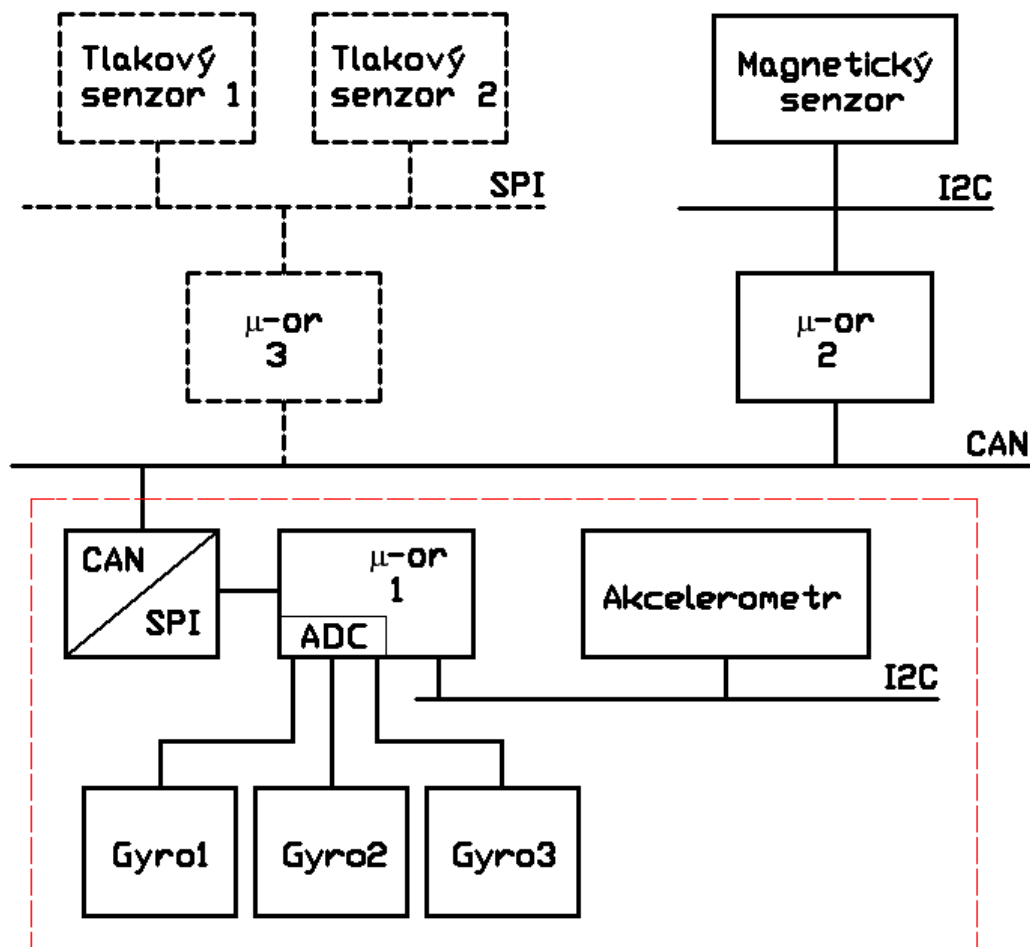
Poté byl vytvořen samostatný modul bez procesorové jednotky s digitálním magnetickým kompasem. Který sloužil jako zkušební model.

V poslední fázi byla vytvořena konečná podoba modulu inerciálního systému s dokonalejším akcelerometrem, a také přibyl převodník na sběrnici CAN, po které bude jednotka posílat data nadřazenému systému ke zpracování.

7.1 Blokové schéma systému

Systém se bude skládat ze dvou částí. První inerciální část je složena z gyroskopů a akcelerometru. Druhá neinerciální část se skládá z digitálního magnetického kompasu. Třetí část (označena čárkovane) by měla být jen jako orientační, pro snímání poměrné rychlosti. Tlakový senzor 1 bude měřit atmosférický tlak a druhý tlakový senzor měří tlak proudu vzduchu působícího proti automobilu.

Tyto tři části budou připojeny ke sběrnici CAN, přes niž budou odesílat data nadřazenému řídicímu systému.



Obr. 51 Blokové schéma navrženého systému

7.2 Modul inerciálního zkušebního systému

V této části jsou umístěny gyroskopické senzory a akcelerometr. Tato část je řízena samostatným mikroprocesorem (viz. Obr. 52). Modul je osazen na oboustranném tištěném spoji o velikosti 55 x 40 mm. Velikosti pasivních SMD součástek je 1206, které jsou tak velké jako použitý akcelerometr.

Modul je napájen stejnosměrným stabilizovaným napětím 3V, které je přivedeno na napájecí konektor. Funkčnost systému signalizuje červená LED dioda, která při připojení napětí několikrát krátce problikne a poté zůstane svítit. Další tři zelené LED diody signalizují nulové zrychlení v osách X, Y a zrychlení 1g v ose Z, čímž vlastně signalizují vodorovnou polohu systému.

Pro komunikaci s okolím je z tohoto modulu vyvedena sériová linka UART. Proto je nutné ještě připojit externí převodník na RS232 nebo USB. Datová rychlost linky je nastavena procesorem na 115200 b/s. Procesor vysílá data ze senzorů v následujícím formátu:

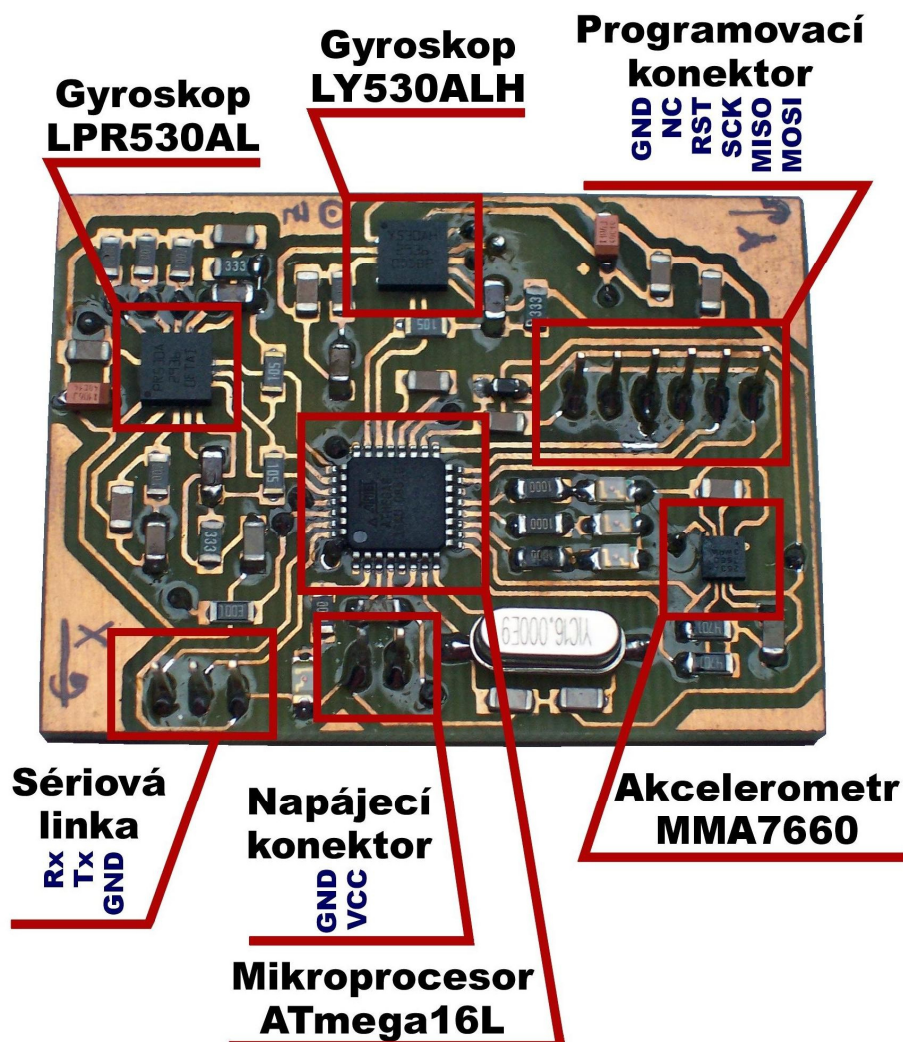
#499,498,501,500,502,1,0,21\$

kde # a \$ jsou uvozovací a ukončovací znaky řetězce, první tři hodnoty jsou úhlová rychlost v daných osách (X, Y, Z), čtvrtá a pátá hodnota jsou referenční napětí gyroskopů a poslední tři hodnoty jsou aktuální zrychlení v daných osách (X, Y, Z).

Jsou zde použity gyroskopy LPR530AL a LY530ALH. Gyroskop LPR530AL snímá natočení systému v X (pitch) a Y (roll), LY530ALH snímá natočení systému v třetí ose Z (yaw). Jejich analogové výstupní hodnoty a referenční jsou převedeny A/D převodníky integrovanými v řídicím procesoru.

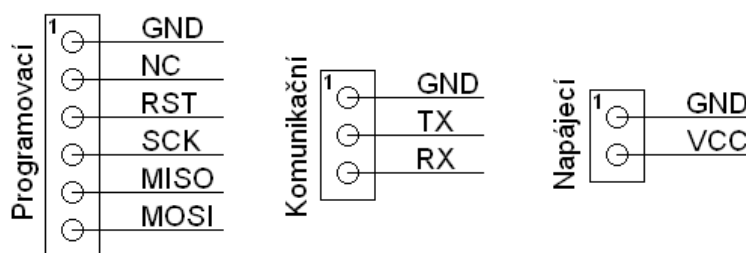
Pro snímání zrychlení je zde použit akcelerometr firmy Freescale MMA7660. Akcelerometr má bohužel jen 6bitový digitální výstup, proto není měření přesné. V nové verzi byl nahrazen akcelerometrem MMA7455 s 10bitovým výstupem. MMA7660 komunikuje s řídicím procesorem pomocí sériové linky I²C.

Jako řídicí prvek inerciálního systému je použit mikroprocesor firmy Atmel s označením ATmega8L, který pracuje s nízkým napájecím napětím, jelikož ostatní senzory pracují s napětím okolo 3V.



Obr. 52 Fotografie a popis zkušebního modulu

Na následujícím obrázku jsou popsány jednotlivé piny použitých konektorů zkušebního modulu.



Obr. 53 Popis konektorů zkušebního modulu

U komunikačního konektoru je vyvedena sběrnice UART z procesoru. Pro převod na RS232 nebo USB musí být připojen převodník. Vstupní napájecí napětí VCC je 3V.

7.3 Výsledný modul inerciálního systému

Konečné řešení modulu inerciálního systému je vidět na obr. X. Modul odpovídá červeně označené čárované části blokového schéma (viz Obr. X). Obsahuje gyroskopické senzory (LPR530AL, LY530ALH), akcelerometr (MMA7455L), mikroprocesor (ATmega16), radič (MCP2510) a budič (SN65HVD1040) sběrnice CAN. Tato část je řízena samostatným mikroprocesorem (viz. Obrázek X). Modul je umístěn na oboustranném tištěném spoji o velikosti 90 x 50 mm. Velikosti pasivních SMD součástek umístěných u senzorů je 0603, ostatní jsou velikosti 1206.

Modul je napájen stejnosměrným napětím v rozsahu 7V až 20V, které je přivedeno na napájecí konektor. Funkčnost systému signalizuje červená LED dioda, která při připojení napětí několikrát krátce problikne a poté zůstane svítit.

Hlavní komunikační sběrnice je zde CAN. Pomocí ní bude systém komunikovat s nadřazeným systémem, kterému skrz ni bude posílat aktuální data ze senzorů. Je ale také vybaven sériovou linkou pro připojení k počítači. Tato linka ovšem potřebuje připojení externího převodníku na RS232 nebo USB. Datová rychlost sériové linky je nastavena procesorem na 115200 b/s. Procesor vysílá data ze senzorů stejně jako zkušební modul v následujícím formátu:

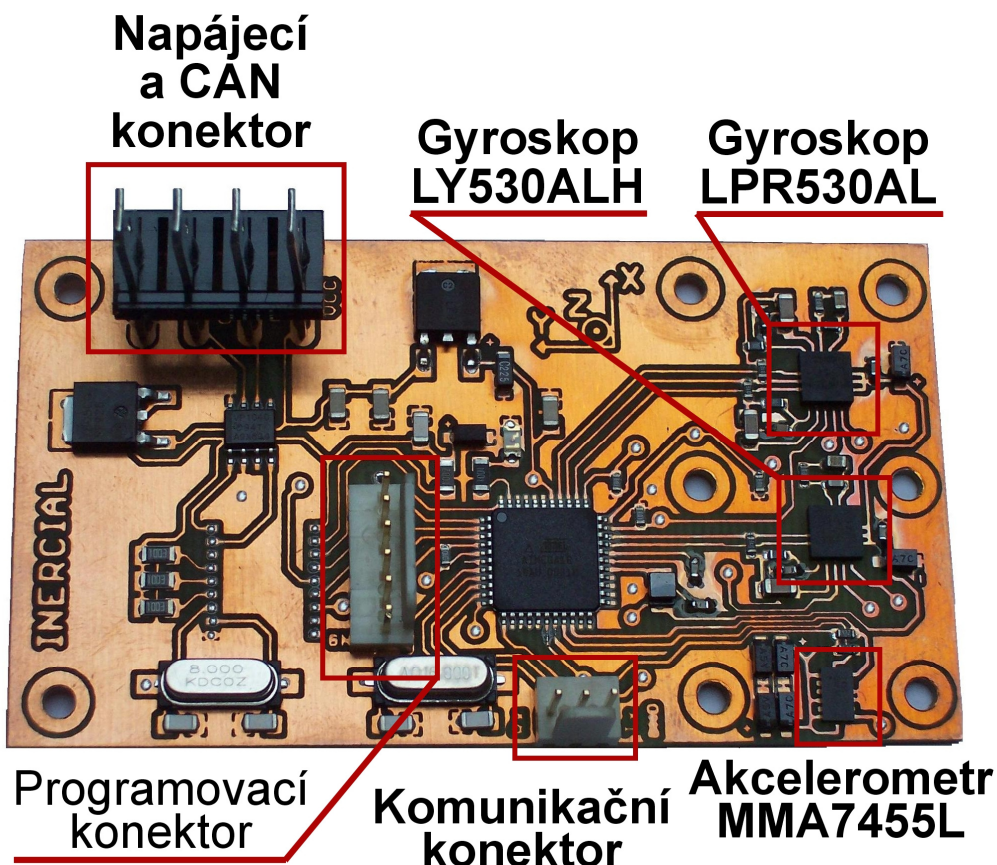
#499,498,501,500,502,1,0,21\$

kde # a \$ jsou uvozovací a ukončovací znaky řetězce, první tři hodnoty jsou úhlová rychlost v daných osách (X, Y, Z), čtvrtá a pátá hodnota jsou referenční napětí gyroskopů a poslední tři hodnoty jsou aktuální zrychlení v daných osách (X, Y, Z).

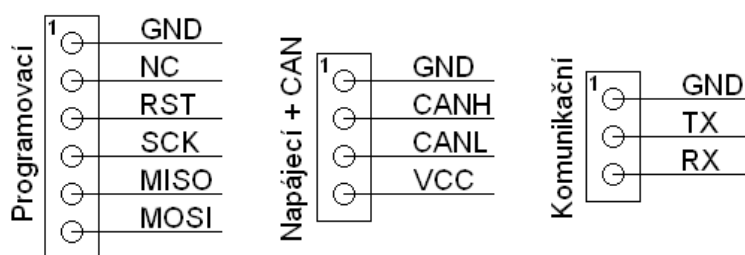
Gyroskop LPR530AL snímá natočení systému v X (pitch) a Y (roll), LY530ALH snímá natočení systému v třetí ose Z (yaw). Jejich analogové výstupní hodnoty a referenční jsou převedeny A/D převodníky integrovanými v řídicím procesoru.

Pro snímání zrychlení je zde použit akcelerometr firmy Freescale MMA7455L. Snímá zrychlení ve třech osách a data posílá procesoru prostřednictvím sériové sběrnice I²C.

Jako řídicí prvek inerciálního systému je použit mikroprocesor firmy Atmel s označením ATmega16L, který pracuje s nízkým napájecím napětím, jelikož ostatní senzory pracují s napětím okolo 3V.



Obr. 54 Fotografie a popis výsledného modulu



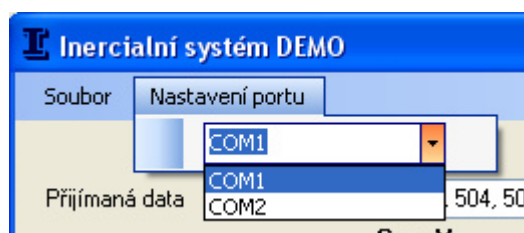
Obr. 55 Popis konektorů výsledného modulu

U komunikačního konektoru je vyvedena sběrnice UART z procesoru. Pro převod na RS232 nebo USB musí být připojen převodník. Vstupní napájecí napětí VCC se pohybuje v rozmezí 7V až 20V.

8 Demonstrační program

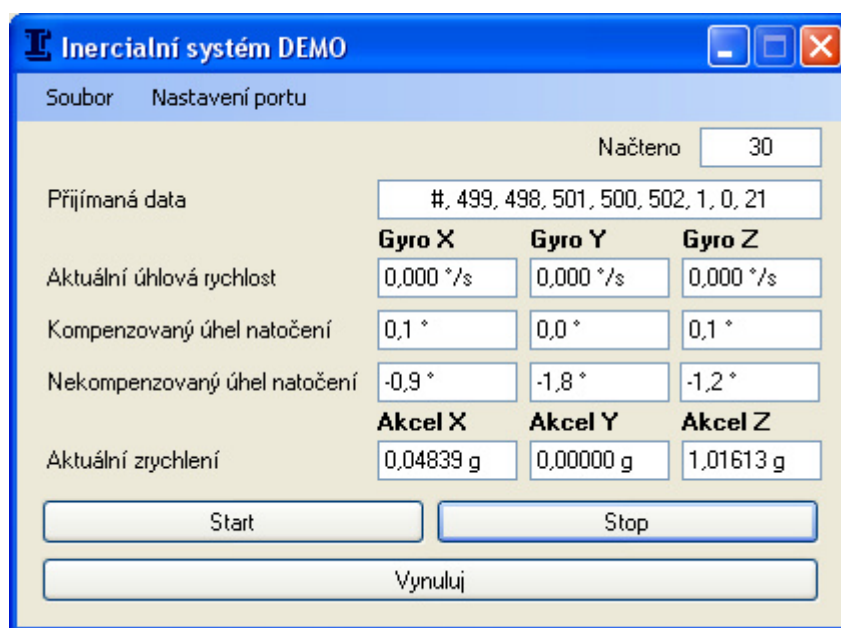
Jelikož data bude zpracovávat nadřazený rychlejší systém, byl pro názornou ukázkou funkce senzorů vytvořen tento demonstrační software. Vytvořil jsem jej ve vývojovém prostředí Microsoft Visual C# 2005.

Software komunikuje s řídicím procesorem na desce inerciálního systému pomocí sériové komunikační linky RS232. V menu programu si můžete vybrat z aktuálně dostupných sériových portů kliknutím na položku „Nastavení portu“. Port vybereme z roletového menu, které je aktualizováno po každém rozbalení (viz. Obr. 56).



Obr. 56 Výběr sériového portu

Po vybrání portu, nebo ponechání výchozího (COM1) můžeme spustit komunikaci pomocí stisku tlačítka „Start“ (viz. Obr. 57).



Obr. 57 Okno demonstračního programu

V prvním textovém poli je zobrazen počet přijatých bytů od procesoru inerciální soustavy, který se mění podle natočení a rotace soustavy.

Na druhém řádku jsou zobrazena data ve formátu vysílaném procesorem. Obsahuje první úvodní znak „#“ a za ním jsou data oddělena čárkami. Prvních pět údajů jsou výstupní analogová data tří os a dvě referenční napětí gyroskopů převedena pomocí 10bitových převodníků na digitální hodnotu. Poslední tři hodnoty jsou zrychlení v jednotlivých osách akcelerometru. Ukončovací znak se zde nezobrazuje.

Dále následuje část, ve které jsou zpracována data z gyroskopů (viz. Obr. 58). Je zde zobrazena aktuální úhlová rychlost, což je výstupní veličina gyroskopů v jednotkách $^{\circ}/s$. Na dalších dvou řádcích jsou aktuální natočení inerciální soustavy v jednotlivých osách. Natočení soustavy se počítá pomocí integrace úhlové rychlosti. V mém případě je soumou aktuálních úhlových rychlostí v daných okamžicích násobených časem mezi jednotlivými vzorky. Rozdíl mezi kompenzovaným a nekompenzovaným úhlem natočení je v tom, že u nekompenzovaného natočení roste chyba s časem, jelikož senzory nejsou dokonalé a snímání není plynulé. Pro kompenzaci je využit akcelerometr, který nuluje natočení v jednotlivých osách při zjištění nulového zrychlení (osy X, Y) nebo zrychlení $1g$ pro sou Z.

	Gyro X	Gyro Y	Gyro Z
Aktuální úhlová rychlost	0,000 $^{\circ}/s$	0,000 $^{\circ}/s$	0,000 $^{\circ}/s$
Kompenzovaný úhel natočení	0,1 $^{\circ}$	0,0 $^{\circ}$	0,1 $^{\circ}$
Nekompenzovaný úhel natočení	-0,9 $^{\circ}$	-1,8 $^{\circ}$	-1,2 $^{\circ}$

Obr. 58 Část s daty z gyroskopů

V poslední části jsou zobrazena aktuální zrychlení akcelerometru ve všech třech osách (viz. Obr. 59). Aktuální rychlost dostaneme integrací zrychlení a další integrací bychom dostali dráhu inerciálního systému. V mém případě by to byla opět suma aktuálních zrychlení v daných časových okamžicích násobených časem mezi jednotlivými vzorky pro výpočet aktuální rychlosti a pro výpočet dráhy je nutno ještě jednou násobit časem.

	Akcel X	Akcel Y	Akcel Z
Aktuální zrychlení	0,04839 g	0,00000 g	1,01613 g

Obr. 59 Část s daty z akcelerometru

Program se ovládá pomocí tří tlačítek „Start“, „Stop“ a „Vynuluj“ (viz. Obr. 60). Tlačítkem start spustíme příjem dat z inerciální soustavy, tlačítkem stop opět příjem dat zastavíme. Tlačítko vynuluj, slouží k vynulování aktuálních nekompenzovaných úhlů natočení systému.

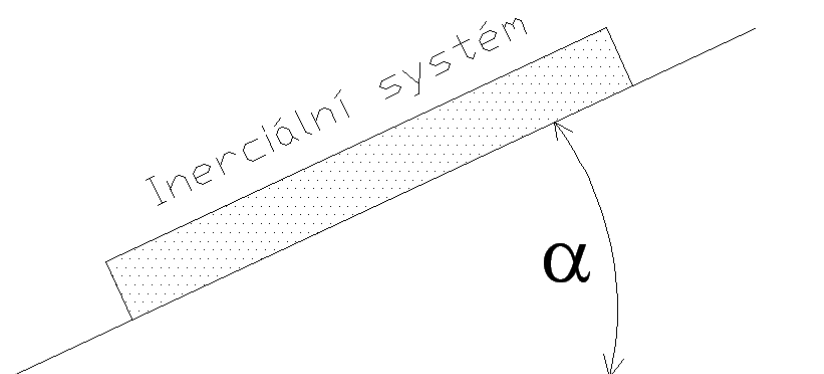
Start	Stop
Vynuluj	

Obr. 60 Ovládání programu

9 Výsledky testování

Při zkoušení funkčnosti a přesnosti měření hotového modulu byly zjištěny výsledky uvedeny níže. Zařízení bylo připojeno k počítači pomocí sériové linky RS232 a měřilo se pomocí demonstračního programu (viz. Kapitola 9).

První měření spočívalo v měření náklonu okolo osy Y (měření úhlu α), které je názorně ukázáno na obrázku 61. Bylo tedy využito gyroskopu



Obr. 61 Měření náklonu systému

V následující tabulce jsou zobrazeny naměřené hodnoty. Symbolem α je označen reálný úhel naklonění systému, α_P a α_R označují naměřený náклон při pomalém a rychlém pohybu. Z výsledků je patrné, že při pomalejším pohybu systému jsou výstupní data gyroskopu přesnější než při pohybu rychlém. Ale oboje zhruba odpovídá a danému natočení.

Tab. 3 Měření natočení gyroskopem

α [°]	α_P [°]	α_R [°]
0	0,1	-0,2
5	5,3	5,3
10	10,3	10,9
15	15,2	17,0
20	20,1	22,3
25	25,0	27,2
30	29,8	32,8
35	35,1	38,5
40	39,7	43,9
45	44,5	48,8
50	50,0	55,2
55	54,7	60,8
60	58,8	66,1

65	64,0	71,4
70	68,7	77,3
75	74,1	81,9
80	79,1	87,8
85	83,9	93,4
90	88,6	98,2

Dále bylo odzkoušeno, zdali má vliv na přesnost senzorů dlouhodobější provoz, kdy se jakoby zahřejí na provozní teplotu. Po zapnutí jsem zaznamenal, jak a o kolik se mění výstupní ofset senzoru v klidové poloze. Poté jsem tedy nechal systém běžet po dobu 30 minut v ustálené poloze. Následná kontrola výstupního signálu ukázala, že toto nemá na dané senzory viditelný vliv.

Na závěr jsem změřil závislost výstupní hodnoty akcelerometru na náklonu systému. Princip měření je shodný s prvním měřením a je zobrazen na obrázku X.

Tab. 4 Měření náklonu akcelerometrem

α [°]	a [ms^{-2}]
0	0,048g
10,0	0,194g
20,0	0,387g
30,0	0,484g
40,0	0,677g
50,0	0,823g
60,0	0,919g
70,0	0,960g
80,0	1,016g
90,0	1,113g

Výsledky jsou zobrazeny v tabulce X. Výstupní hodnotou je zde tíhové zrychlení g. Při náklonu 90° by mělo být zrychlení 1g, v mém případě bylo naměřeno 1,113g.

10 Závěr

Tato diplomová práce měla popsat princip měření orientace objektu ve statických a dynamických podmínkách. Pro měření pohybu a natočení systému se používá akcelerometrů a gyroskopů. Proto byla nejdříve ověřena dostupnost a přesnost senzorů s ohledem na jejich cenu. V současné době většina senzorů využívá mikromechanické systémy. Mikroelektromechanické systémy (MEMS – Micro-electromechanical systems) je výrobní technologie používaná pro výrobu malých integrovaných zařízení nebo systémů, které kombinují mechanické a elektrické součásti. Vyrábějí se stejnými metodami litografie, jako se vyrábějí polovodiče nebo jiné mikročipy a mohou měřit od několika mikrometrů do několika milimetrů. Mikromechanické části jsou tvořeny důmyslnou manipulací křemíku a jiných substrátů. Použitím různých metod zpracování se provádí selektivní odstranění křemíku nebo naopak přidání dodatečných strukturních vrstev pro vytvoření mechanických a elektrických částí.

Použitím a zkombinováním těchto senzorů vzniká inerciální systém používající se pro navigace. Vytvořit takovýto systém bylo cílem této práce. Daný navigační systém je určen do automobilu jako snímač aktuální rychlosti, polohy a natočení. Používá se v kombinaci s GPS navigací, jelikož po startu tohoto zařízení je nutné znát počáteční polohu. Signály ze senzorů je nutné stále přepočítávat a tudíž je nutný vysoký výpočetní výkon. Z tohoto důvodu zhotovené zařízení pouze jako zprostředkovatel aktuálních zrychlení a natočení ze senzorů nadřazenému systému. Komunikace s nadřazeným systémem s vyšším výpočetním výkonem bude probíhat po sběrnici CAN využívající se v automobilovém průmyslu.

Velkou výhodou použití inerciální navigace je tzv. soběstačnost navigačního systému, což znamená, že pro funkci nejsou nutné žádné externí objekty ani signály. Doplnění inerciálního navigačního systému o elektronický kompas snižuje chybu způsobenou integrací signálu z akcelerometrů a gyroskopů. Pro orientační měření rychlosti oproti prostředí se využívá jako v letectví Pitotovy trubice, která porovnává celkový a statický tlak vzduchu. Nevýhodou je zatím stále nedostatečná přesnost senzorů inerciální navigace pro mnohé aplikace.

Pro zobrazení měřených veličin byl vytvořen demonstrační program na počítači komunikující s inerciálním systémem pomocí sériové sběrnice RS232.

Použitá literatura

- [1] HALL, David L. - LLINAS, James.: *Handbook of multisensor data fusion*. CRC Press LLC 2001.
- [2] Brown, Martin C.: *Hacking Google Maps and Google Earth*. Wiley Publishing 2006.
- [3] PALLAS-ARENY, Ramon - WEBSTER, John G.: *Sensors and signal conditioning*. 2 Rev Ed. John Wiley and Sons Ltd (United States), 2000.
- [4] Ďaďo, S. - Kreidl, M.: *Senzory a měřicí obvody*. Praha, ČVUT 1999.
- [5] Doleček, J.: *Moderní učebnice elektroniky – 2. díl*. Praha, BEN - technická literatura 2005.
- [6] Humlhans, J.: *Zajímavá zapojení 3. díl*. Praha, BEN - technická literatura 2005.
- [7] Martinek, R.: *Senzory v průmyslové praxi*. Praha, BEN - technická literatura 2008.
- [8] Ripka, P.- Ďaďo, S. - Kreidl, M.- Novák, J.: *Senzory a převodníky*. Praha, ČVUT 2005.
- [9] Dudáček, K.: *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN*. Publikované 2002. 19 s.
URL: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/Accelerometers.html>>
- [10] Doskočil, E.: *Zařízení pro inerciální navigaci*. Praha, 2006. 53 s. Bakalářská práce na Elektrotechnické fakultě Českého vysokého učení technického v Praze na katedře řídicí techniky. Vedoucí diplomové práce Pavel Němeček.
URL: <http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/2/24/Bp_2006_cerny_radovan.pdf>
- [11] Schauer, P.: *Inerciální a neinerciální vztažné soustavy*. Brno, FAST VUT Brno 2007. 3 s.
URL: <http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/inercialni_a_neinercialni_soustavy.pdf>
- [12] Syrovátka, V.: *Úvod do systémů inerciální navigace*. Praha, 2007. 9 s.
URL: <<http://www3.fs.cvut.cz/web/uploads/media/UvoddoSystemuInercialniNavigace.pdf>>
- [13] Chudáček, V. - Lochman, L. - Stolin, M.: *Navigační satelitní systémy v železniční zabezpečovací technice*. Praha, 2001. 10 s.
URL: <<http://www.cd rail.cz/VT S/CLANKY/1205.pdf>>
- [14] URL: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/Accelerometers.html>>
- [15] URL: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=39>>
- [16] URL: <<http://l202.fi.muni.cz/?tpl=doc/project3&lang=cs>>
- [17] URL: <<http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/gyroskopy.htm>>
- [18] URL: <<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k42-tlak.htm>>
- [19] URL: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>>
- [20] URL: <<http://fyzmatik.pise.cz/76205-gyroskop.html>>
- [21] *Stand-Alone CAN Controller with SPI™ Interface MCP2510*. U.S.A.: Microchip Technology Incorporated, 2002. 80 s. Datasheet.
URL: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21291F.pdf>>
- [22] *Low-power CAN Transceiver with bus wake-up SN65HVD1040*. Dallas: Texas Instruments, 2009. 23 s. Datasheet.
URL: <<http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=sn65hvd1040&fileType=pdf>>
- [23] *8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash ATmega16A*. San Jose: Atmel Corporation, 2002. 352 s. Datasheet.
URL: <http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8154.pdf>
- [24] *±2g/±4g/±8g Three Axis Low-g Digital Output Accelerometer MMA7455L*. U.S.A.: Freescale Semiconductor, 2009. 35 s. Datasheet.
URL: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7455L.pdf?fsrch=1&WT_TYPE>

=Data%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation>

[25] *High performance ± 300 °/s analog yaw-rate gyroscope LY530ALH*. U.S.A.: STMicroelectronics, 2009. 12 s. Datasheet.

URL: <<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/15801/ly530alh.pdf>>

[26] *Dual axis pitch and roll ± 300 °/s analog gyroscope LPR530AL*. U.S.A.: STMicroelectronics, 2009. 12 s. Datasheet.

URL: <<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/15812/lpr530al.pdf>>

[27] *3-Axis Digital Compass ICHMC5843*. Plymouth: Honeywell International Inc., 2009. 12 s. Datasheet.

URL: <<http://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=DA9ACFE3C-F7C0-9998-6085-D9D84941499D>>

[28] *Miniature SPI Digital Barometer MPL115A1*. U.S.A.: Freescale Semiconductor, 2010. 8 s. Datasheet.

URL: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL115A1.pdf?fsp=1&WT_TYPE=Data%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation>

Seznam příloh

Příloha I: Adresářová struktura přiloženého CD

Příloha I: Adresářová struktura přiloženého CD

- /Demonstrační aplikace v prostředí C#
- /Diplomová práce
- /Dokumentace k senzorům
- /Fotografie modulů
- /Schéma a plošný spoj konečného inerciálního systému
- /Schéma a plošný spoj modulu digitálního kompasu
- /Schéma a plošný spoj testovacího inerciálního systému
- /Zdrojové kódy procesorů v prostředí BASCOM